

Синтез изображений улучшенного качества в миллиметровом диапазоне длин волн

Л.В.Волков, А.И.Воронко, А.Р.Карапетян, С.А.Тихомиров

Теоретически и экспериментально продемонстрированы возможности квазиоптического формирования изображений маскированных объектов, подсвечиваемых излучением миллиметрового диапазона длин волн. Исследовано влияние пространственного эффекта Гиббса, а также других деструктивных факторов на качество получаемых изображений. Предложен метод синтеза изображений повышенного визуального качества и информационного содержания в миллиметровом диапазоне длин волн. Показано хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: квазиоптическая система формирования изображений, миллиметровый диапазон длин волн, эффект Гиббса, когерентность излучения, приемная матрица антенно-связанных диодов Шоттки, синтезирование изображений улучшенного качества.

1. Введение

Актуальность оптимального активного освещения маскированных объектов при квазиоптическом формировании их изображений в миллиметровом и субмиллиметровом (ММ и СММ) диапазонах длин волн хорошо известна. В настоящее время важность решения этих вопросов возросла: с одной стороны – ввиду разработки технологий многоэлементных сенсоров ММ диапазона, способных формировать изображения объектов в телевизионном стандарте [1, 2], с другой стороны – благодаря постоянно возрастающему значению практического применения методов и систем формирования изображений в данных диапазонах. Активная подсветка наблюдаемых объектов позволяет решать проблему низкого контраста пассивных (радиометрических) изображений в ММ диапазоне, особенно остро проявляющуюся в закрытых помещениях, а также обеспечивает передачу на приемное устройство системы формирования изображений (СФИ) существенно больших объемов информации о маскированных объектах, чем те, которые могут быть получены посредством использования традиционных радиометрических СФИ.

Различные подходы к получению активных (подсвечиваемых) изображений достаточного визуального качества и информационного содержания в различных частотных диапазонах, начиная от СВЧ (37.7 ГГц) и до СММ диапазона (300 ГГц), описаны в целом ряде работ [3–8]. При этом нередко получение искаженных изображений объяснялось низким качеством квазиоптических элементов, влиянием спекл-шумов или побочной интерференцией переотраженных пучков излучения. В настоя-

щей работе показано, что на качество активных изображений в ММ и СММ диапазонах значительное влияние оказывает пространственный эффект Гиббса. Выявлены и другие факторы, разрушающие качество таких изображений. Теоретически и экспериментально продемонстрированы возможности синтеза изображений повышенного визуального качества в широком (ММ и СММ) диапазоне длин волн.

2. Теоретическое рассмотрение

При теоретическом рассмотрении особенностей формирования изображений в частично-когерентном излучении ММ и СММ диапазонов будем опираться на классический подход, изложенный в работе [9], принимая во внимание тот факт, что эффекты дифракции и интерференции в системах различного назначения достаточно полно описываются корреляционными функциями второго порядка [6, 9–11]. Для изопланатной квазиоптической СФИ, имеющей на частоте ν импульсный отклик $h(\mathbf{u}_i - \mathbf{x}_i, \nu)$, можно записать:

$$G(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \nu) = \int_D \int_D d^2x_1 d^2x_2 h^*(\mathbf{u}_1 - \mathbf{x}_1, \nu) \times h(\mathbf{u}_2 - \mathbf{x}_2, \nu) G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu), \quad (1)$$

где $G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu)$ и $G(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \nu)$ – функции взаимной спектральной плотности излучения во входной и выходной плоскостях СФИ соответственно; \mathbf{x}_i и \mathbf{u}_i – радиус-векторы точек указанных плоскостей; $D \times D$ – область определения функции $G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu)$. Если СФИ имеет различные расстояния от плоскости линзы до входной плоскости d_1 и от плоскости линзы до выходной плоскости d_2 , то радиус-векторы \mathbf{x}_i и \mathbf{u}_i в (1) должны быть заменены приведенными радиус-векторами \mathbf{x}_i/d_1 и \mathbf{u}_i/d_2 соответственно.

Далее будет учитываться, что измеряемая инерционными приемниками интенсивность излучения в прост-

ранственной точке ξ связана со взаимной спектральной плотностью излучения в этой точке следующим образом:

$$I(\xi) = \int_0^\infty dv G(\xi, \xi, v). \quad (2)$$

В общем случае для расчета взаимной спектральной плотности излучения на входе СФИ следует учитывать характеристики рассеивания излучения объектом и угловое распределения излучения для каждого значения частоты. Далее будет показано, что в ММ диапазоне особенности отражения излучения от большинства объектов существенно влияют на возможности формирования пространственно-некогерентных изображений высокого качества.

В настоящей работе для осуществления раздельного исследования результатов воздействия различных деструктивных факторов на качество формируемых в ММ диапазоне изображений использовались пропускающие излучение тестовые объекты. В этом случае при равномерном освещении объектов квазимонохроматическим излучением со средней интенсивностью I_0 и центральной частотой ν_0 (для которого $\delta\nu \ll \nu_0$, где $\delta\nu$ – ширина полосы частот) распределение интенсивности на выходе СФИ можно записать в виде

$$I(\mathbf{u}, \nu_0) = I_0 \int_D \int_D d^2\mathbf{x}_1 d^2\mathbf{x}_2 k^*(\mathbf{x}_1, \nu_0) k(\mathbf{x}_2, \nu_0) \times \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0) h^*(\mathbf{u} - \mathbf{x}_1, \nu_0) h(\mathbf{u} - \mathbf{x}_2, \nu_0), \quad (3)$$

где $k(\mathbf{x}_i, \nu_0)$ – амплитудный коэффициент пропускания объекта; $\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0)$ – степень пространственной когерентности излучения во входной плоскости, определяемая из соотношения

$$\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0) = \frac{G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0)}{[G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1, \nu_0)G(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2, \nu_0)]^{1/2}}. \quad (4)$$

Из (3) видно, что распределение интенсивности на выходе СФИ в общем случае зависит от пространственной когерентности подсвечивающего излучения.

Из (3) могут быть получены два предельных случая. Для полностью пространственно-когерентного освещения $\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0) = 1$ имеем

$$I(\mathbf{u}, \nu_0) = I_0 \left| \int_D k(\mathbf{x}, \nu_0) h(\mathbf{u} - \mathbf{x}, \nu_0) d\mathbf{x} \right|^2 = I_0 |k(\mathbf{x}, \nu_0) \otimes h(\mathbf{x}, \nu_0)|^2 = I_0 |K_{\text{coh}}(\mathbf{u}, \nu_0)|^2, \quad (5)$$

где $K_{\text{coh}}(\mathbf{u}, \nu_0)$ – нормированное распределение комплексной амплитуды излучения в выходной плоскости СФИ. В случае пространственно-некогерентного излучения, когда $\gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \nu_0) = \delta(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)$,

$$I(\mathbf{u}, \nu_0) = I_0 \int_D |k(\mathbf{x}, \nu_0)|^2 |h(\mathbf{u} - \mathbf{x}, \nu_0)|^2 d\mathbf{x} = I_0 |k(\mathbf{x}, \nu_0)|^2 \otimes |h(\mathbf{x}, \nu_0)|^2. \quad (6)$$

Соотношения (5), (6) позволяют оценить ограничения, накладываемые на возможности квазиоптического

формирования изображений в ММ и СММ диапазонах. Функцию $K_{\text{coh}}(\mathbf{u}, \nu_0)$, учитывая различие расстояний d_1 и d_2 , можно переписать в следующем виде:

$$K_{\text{coh}}(\mathbf{u}, \nu_0) = \alpha' F_u^{-1} \left[P \left(\frac{cd_2}{\nu_0} \boldsymbol{\eta} \right) \exp \left[-W \left(\frac{cd_2}{\nu_0} \boldsymbol{\eta} \right) \right] \times F_\eta \left[k \left(\frac{d_1}{d_2} \mathbf{x}, \nu_0 \right) \right] \right], \quad (7)$$

где $F_\eta[\]$ и $F_u^{-1}[\]$ – операторные символы, обозначающие прямое и обратное преобразования Фурье по переменным $\boldsymbol{\eta}$ и \mathbf{u} ; $P(\xi)$ – функция, описывающая форму входного зрачка фокусирующего элемента – линзы (в частности, для зрачка круглой формы $P(\xi) = 1$ при $|\xi| \leq L/2$ и $P(\xi) = 0$ при $|\xi| > L/2$); L – диаметр фокусирующей линзы; $W(\xi)$ – функция, описывающая аберрационные искажения излучения, возникающие из-за несовершенства фокусирующего элемента; α' – константа.

Нетрудно видеть, что в пренебрежении влиянием аберрационной функции соотношение (7) представляет собой усеченное обратное преобразование, в котором часть масштабированного пространственного спектра объекта в области верхних пространственных частот резко подавляется отсекающей функцией $P[(cd_2/\nu_0)\boldsymbol{\eta}]$. С учетом упомянутого выше масштабирования верхняя частота отсечки пространственного спектра изображения объекта

$$\Theta = \frac{L\nu_0}{2cd_1}. \quad (8)$$

Таким образом, когерентная СФИ действует как пространственный фильтр с конечной полосой пропускания, обеспечивающий резкое обрезание части спектра объекта, и ее выходной двумерный сигнал, следовательно, описывается функцией с усеченным спектром.

Из теории оптических и радиотехнических систем с такими полосами пропускания известно, что выходные сигналы этих систем всегда искажены неустраняемыми осцилляционными колебаниями, если входные сигналы описываются разрывными функциями. Этот эффект в общем случае имеет название эффекта Гиббса [12].

Практическое использование квазиоптических систем в ММ диапазоне связано с необходимостью получения изображений главным образом металлических или квазиплоских пластиковых объектов, отражение от которых имеет ярко выраженный зеркальный характер. Распределение амплитуд отраженного излучения будет описываться в этом случае указанными разрывными функциями. Оценим возможные последствия проявления эффекта Гиббса для когерентных систем формирования изображений в ММ диапазоне спектра. Для этого представим коэффициент пропускания (отражения) объекта (кванта) в виде

$$k(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = k \prod_{i=1}^2 Y(x_i - x_{i0}), \quad (9)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ – радиус-вектор точек во входной плоскости СФИ; x_i – декартовы координаты этих точек, а одномерная функция $Y(x_i)$ – классическая ступенчатая функция Хэвисайда; k – константа. Таким образом, $k(\mathbf{x})$ имеет разрывы вдоль прямых $x_1 = x_{10}$, $x_2 = x_{20}$. Для

большей наглядности и без потери общности допустим, что входной зрачок линзы имеет квадратную форму. При этом распределение амплитуд на выходе квазиоптической системы будет описываться, в соответствии с (7), следующей усеченной функцией:

$$K_{\text{coh}}(\mathbf{u}) = k_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{(d_1/d_2)\Theta'(u_1-x_{10}d_2/d_1)} \frac{\sin z_1}{z_1} dz_1 \right) \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{(d_1/d_2)\Theta'(u_2-x_{20}d_2/d_1)} \frac{\sin z_2}{z_2} dz_2 \right), \quad (10)$$

где k_0 – константа; z_i – переменные интегрирования. Второе слагаемое в каждом из сомножителей (10) является интегральным синусом, период осцилляций которого меняется с изменением верхней границы полосы частот $\Theta = \Theta'/2\pi$ из (8), умноженной на коэффициент осуществления в СФИ масштабирования, а характерные точки осцилляций оптически сопряжены с точками указанных линий разрыва. Таким образом, период осцилляций зависит от несущей частоты ν_0 подсвечивающего излучения. При этом общий вид и глубина осцилляций в распределении амплитуд (10) сохраняются для любого значения несущей частоты.

Для характерных частот и параметров фокусирующих элементов в ММ диапазоне пространственный период таких осцилляций, приведенных ко входу СФИ с учетом масштабирующего множителя, может составлять несколько сантиметров, что становится сравнимым с размерами самих объектов, подлежащих наблюдению посредством таких СФИ. Таким образом, следует ожидать появления ярких пятен или других ложных структурных пространственных распределений в когерентных ММ изображениях, которые будут иметь место даже для идеальных (квазиплоских) объектов, не вызывающих каких-либо других шумовых искажений изображений, например спекловых искажений.

Особо следует отметить, что описанный выше осцилляционный характер миллиметровых изображений, наблюдаемых в пространственно-когерентном излучении, в большинстве случаев может сохраниться и при использовании пространственно-некогерентного излучения. Здесь проявляется одно из существенных различий в формировании изображений в миллиметровом и оптическом диапазонах. Дело в том, что, в отличие от оптического излучения, отражение которого в большинстве случаев носит диффузный характер, излучение миллиметрового диапазона отражается от объектов, представляющих прикладной интерес, преимущественно зеркальным образом, причем доля диффузно отраженного излучения может быть относительно малой.

В этом случае из всего широкого диапазона фазово-независимых угловых парциальных компонент, входящих в состав пространственно-некогерентного излучения [13], выделяется только небольшая их часть, которая может удовлетворять условиям зеркального отражения объектом и эффективного захвата отраженного излучения входным зрачком СФИ. Этот фактор и обуславливает высокую пространственную когерентность той доли излучения, которая фактически участвует в формировании подобных «пространственно-некогерентных» изображений, несмотря на то что пространственная когерентность собственно освещающего излучения в зоне нахождения объекта может быть предельно низкой. Со-

ответственно такие «пространственно-некогерентные» изображения будут подвергнуты всем видам искажений, обусловленных достаточно высокой пространственной когерентностью излучения формирующего изображения.

Вышесказанное можно проиллюстрировать, в частности, результатами экспериментов [5], где для реализации пространственно-некогерентного освещения металлического объекта используется вращающееся зеркало со случайно рассеивающей поверхностью. Однако полученное изображение имеет четко выраженную осцилляционную структуру, которая в самом объекте отсутствует. Такого же рода осцилляционные пятна наблюдаются и в работах [3, 4], где их неполная регулярность может быть объяснена совместным действием эффекта Гиббса и когерентных спекл-шумов. В [3, 4] пространственная когерентность не разрушалась. Во всех рассмотренных случаях использовалось излучение с высокой временной когерентностью.

Следует отметить, что столь катастрофическому влиянию эффекта Гиббса в оптике препятствует совершенно другое соотношение между размерами зрачка объектива и длиной волны оптического излучения, что позволяет не учитывать этот эффект как наиболее существенный при искажениях когерентных изображений.

Реализация пространственно-некогерентного освещения в ММ диапазоне с учетом описанных выше факторов представляет практический интерес. Появление эффекта Гиббса тесно связано с формой передаточной функции, которая для пространственно-некогерентной СФИ в соответствии с (6) описывается функцией $F_{\eta}[|h(x, \nu_0)|^2]$. Данная функция равна автокорреляции описанной выше когерентной передаточной функции, поэтому при любом виде последней она не имеет разрыва при обрезании спектра пространственных частот. Это обстоятельство и приводит к снижению влияния эффекта Гиббса на формируемое изображение для пространственно-некогерентных СФИ.

В ММ и СММ диапазонах благодаря наличию когерентных источников излучения с перестраиваемой в широком диапазоне частотой может быть использован другой эффективный подход к преодолению как эффекта Гиббса, так и влияния шумовой когерентной спекл-структуры на качество изображений активных СФИ. В самом деле, амплитуда осцилляций в (10) сохраняется одинаковой для любых частот подсветки, а пространственный период таких осцилляций изменяется с изменением частоты в соответствии с (8). Поэтому при соответствующем выборе интервала частот цифровое или аналоговое накопление разночастотных когерентных изображений благодаря различиям в их шумовых структурах на разных частотах будет приводить к улучшению качества синтезированного (суммарного) изображения. При этом очевидно, что и шумовые спекл-структуры будут различными для изображений, полученных на разных частотах. При суммировании когерентных изображений это вызовет взаимное подавление таких пространственных шумов.

В подобном синтезированном изображении распределение интенсивности имеет вид

$$I(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n \alpha(\nu_{0i}) I(\nu_{0i}) \left| F_{\mathbf{u}}^{-1} \left\{ P \left(\frac{cd_2}{\nu_{0i}} \eta \right) \right\} \right|$$

$$\times \exp \left[- W \left(\frac{cd_2}{v_{oi}} \eta \right) \right] F_{\eta} \left[k \left(\frac{d_1}{d_2} x, v_{oi} \right) \right] \right] \Big|^2 \quad (11)$$

В случае рассмотренного синтезирования можно говорить о трансформации формы некоторой обобщенной передаточной функции такой СФИ в более гладкую, поскольку фактически суммируются усеченные зрачком спектры одного и того же когерентного изображения, но с дискретным нарастанием эффективной ширины функции зрачка. При этом для компенсации частотной зависимости коэффициента отражения или чувствительности приемной матрицы весовые коэффициенты $\alpha(v_{oi})$ можно изменять. Важно также, что такое суммирование можно выполнять только для зеркальных изображений или изображений, полученных при одинаковых углах падения и отражения на разных частотах, что позволяет не использовать диффузоров для получения качественных изображений, а освещать объекты непосредственно передающей антенной источника излучения. В противоположность пространственно-некогерентной системе уменьшается эффективная временная когерентность освещаемого объекта излучения.

Таким образом, любое редуцирование степени когерентности приводит к уменьшению искажений в получаемых изображениях. Очевидно, что наибольших результатов по увеличению визуального качества ММ изображений можно достигнуть при одновременном уменьшении как пространственной, так и временной когерентности.

3. Экспериментальные результаты

Геометрия экспериментальной установки по формированию многочастотных изображений в ММ диапазоне длин волн представлена на рис.1. В качестве фокусирующего элемента квазиоптической системы использовалась полистироловая линза с диаметром входного зрачка 34.5 см и фокусным расстоянием 50 см, чувствительным ММ сенсором приемного устройства служил разработанный авторами [14–16] широкополосный многоэлементный приемник, выполненный в виде матрицы антенно-связанных нелинейных элементов [17]. Матрица была изготовлена на микрополосковой подложке из полиимидфторопласта толщиной 125 мкм. Для каждого приемного элемента матрицы была выбрана логопериодическая антенная конфигурация (рис.2), что позволило обеспечить широкополосность приема по крайней мере в

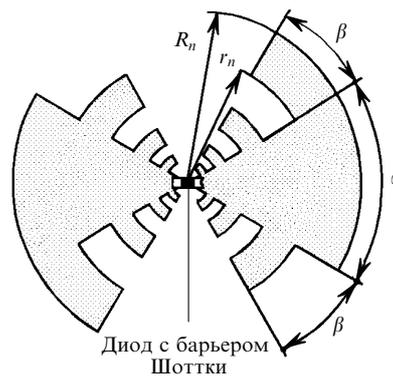


Рис.2. Общий вид антенно-связанного диода Шоттки – элемента приемной матрицы.

диапазоне 40–200 ГГц (для n -го зубца антенны справедливо отношения $R_n/r_n = \sqrt{2}$, $R_n/R_{n+1} = 0.5$, а также $\alpha = 2\beta = 60^\circ$). Во входные клеммы каждой такой антенны методом точечной сварки монтировался диод с барьером Шоттки, выполняющий в данной конструкции роль нелинейного преобразователя токов, наведенных на проводящих поверхностях антенны падающим излучением.

Данная матрица может быть использована как для детекторного приема излучения, когда такими антенно-связанными нелинейными элементами выполняется амплитудное детектирование (квадратичное преобразование) сфокусированных на них сигналов, так и для гетеродинного приема, когда поступающие сигналы квазиоптически смешиваются на нелинейном элементе с гармоническим сигналом внешнего гетеродинного источника, применяемого для преобразования частот поступающих сигналов, с целью их последующего дополнительного усиления в каскадах усилителей промежуточной частоты [4, 17].

Любой тип приемного устройства (в котором используется прямое детектирование, прямое усиление и детектирование или супергетеродинный прием) будет описываться приведенными выше соотношениями, поскольку окончательный каскад любого такого приемного устройства ММ диапазона выполняет нелинейное преобразование входных сигналов с последующим их интегрированием по времени посредством низкочастотной фильтрации. Гетеродинное преобразование сигнала, как известно, не приводит к изменению структуры временного спектра сигналов, а только изменяет величину их несущей.

Размерности используемых матриц составляли 5×5 и 8×8 элементов, при этом матрица и объект размещались на дополнительных механических позиционерах, способных осуществлять под управлением компьютера дополнительное пространственное сканирование матрицы и объекта для поиска плоскости резкого изображения, увеличения информационной емкости формируемых изображений и уменьшения абберационных искажений линзы.

Сигналы элементов матрицы после их усиления оцифровывались посредством аналого-цифрового преобразователя и вводились в память компьютера, используемого для автоматизированного управления элементами системы формирования изображений, обработки изображений и их визуализации.

В качестве тестовых использовались щелевые объекты, характеризующиеся различной периодичностью функции пропускания (аналог мира Фуко, применяемой

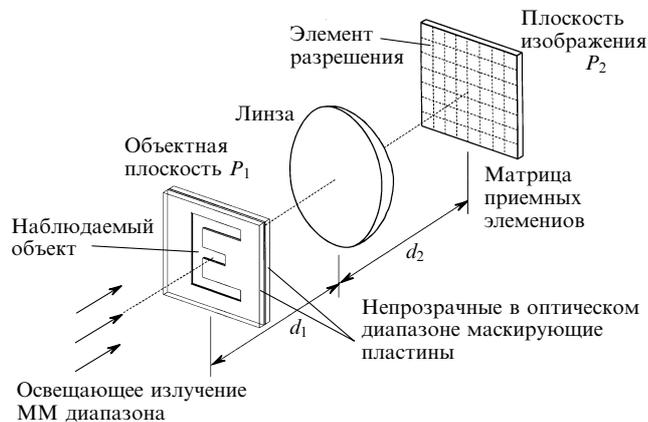


Рис.1. Схема квазиоптического формирования ММ изображений (d_1, d_2 – расстояния от линзы до входной и выходной плоскостей).

для тестирования оптических и инфракрасных систем). С помощью таких объектов можно легко промоделировать влияние различных деструктивных факторов на качество изображений, включая детальное выяснение особенностей воздействия эффекта Гиббса при формировании квазиоптических изображений в широком ММ диапазоне частот.

В использованной схеме многочастотного формирования изображений (см. рис.1) отсутствуют какие-либо устройства для разрушения пространственной когерентности излучения, и изменяющееся по частоте излучение непосредственно освещает объекты в предметной плоскости линзы P_1 (при нормальном падении плоской освещающей волны на плоскость P_1). При этом в качестве источника изменяющегося по частоте излучения использовались лампы обратной волны ОВ-70, ОВ-71 и ОВ-87А, совместно перекрывающие диапазон 52–178 ГГц. Тестовые объекты маскировались однородными по толщине (2 мм) тефлоновыми пластинами, не позволяющими наблюдать объекты в видимом свете.

На рис.3 представлены одномерные поперечные распределения интенсивности в изображениях четырехщелевого периодического объекта с шириной щели 0.6 см (вблизи дифракционного предела для используемых линзы и набора частот), ее длиной 8 см и расстоянием между щелями 0.6 см. При этом штриховые линии отображают результаты численного моделирования, при котором учитывалась конечность полосы пропускания системы формирования изображений, разная для разных частот, линии с точками обозначают экспериментально полученные результаты. Рис.3,а соответствует частоте 56 ГГц – нижней частоте в используемом дискретном наборе частот подсвечивающего объект излучения. Нетрудно видеть, что при изображении четырехщелевого объекта распределение интенсивности имеет два максимума и может интерпретироваться как двухщелевой объект.

Изображение на частоте 79 ГГц также «визуализирует» такой же «двухщелевой» объект с несколько сдвинутыми положениями «ложных» щелей. Для частот 92 и 104 ГГц наблюдается «трехщелевой» объект, и только для частоты 135 ГГц имеет место распределение с четырьмя максимумами, что соответствует реальному четырехщелевому объекту, однако эти максимумы в изображении имеют различную пиковую интенсивность для разных щелей. При этом теоретические и экспериментальные кривые практически совпадают.

Таким образом, при квазиоптическом формировании в ММ диапазоне изображений периодических объектов с характерным размером периодической структуры, сравнимым с дифракционным пределом используемой оптики, возможно возникновение ложных периодических структур, пространственные и яркостные особенности которых зависят от длины волны подсвечивающего излучения. При этом следует отметить, что размер деталей порядка 3–10 мм не является экзотическим для объектов, предназначенных для наблюдения в системах формирования ММ диапазона.

Отличительные особенности квазиоптического отображения в ММ диапазоне реальных объектов с рассмотренными пространственными размерами определяются фундаментальными основами формирования когерентных изображений, которые именно для ММ диапазона (в отличие от оптического или даже ИК диапазона) начинают приобретать важное практическое значение.

На рис.3,е представлено синтезированное изображение, полученное в результате суммарного накопления сигналов одночастотных изображений. При этом сигнал в каждом пикселе результирующего синтезированного изображения равен взвешенной сумме сигналов в соответствующих пикселях рассмотренных одночастотных когерентных изображений (при суммировании экспериментальных данных учитывалась различная чувстви-

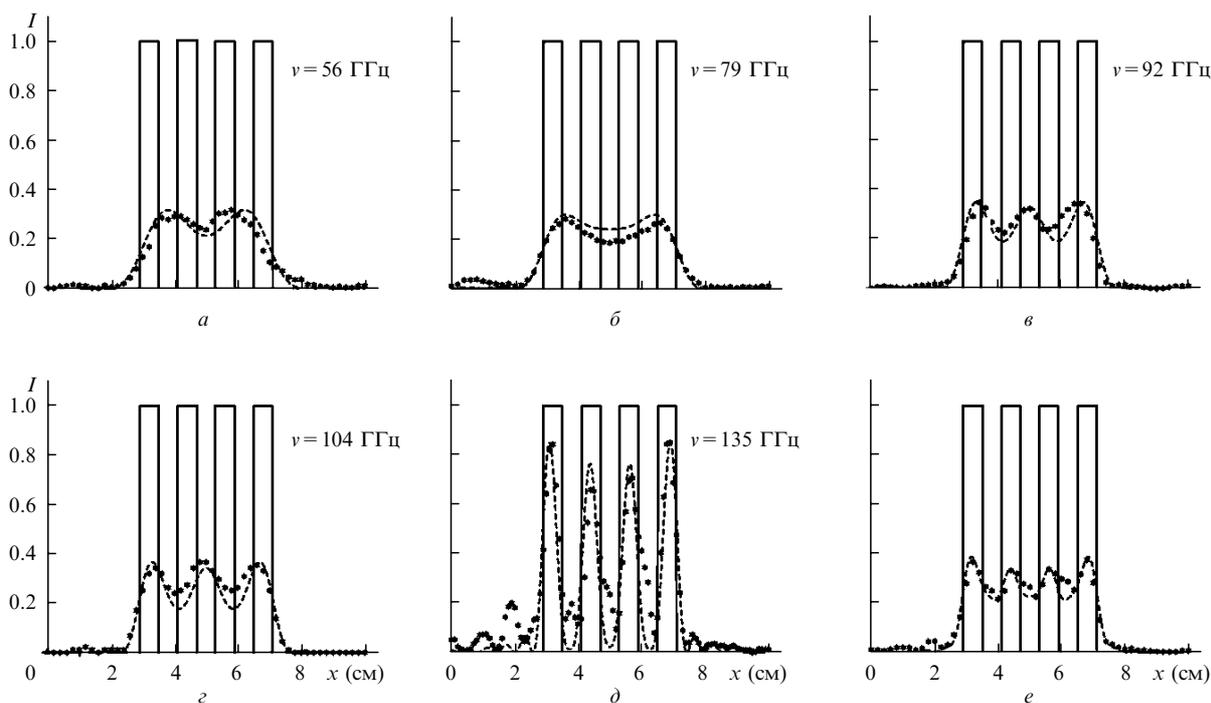


Рис.3. Экспериментальные (точки) и теоретические (штриховая кривая) одномерные распределения интенсивности в изображениях четырехщелевого объекта (ширина щели и расстояние между щелями 0.6 см, ее длина – 8 см) при освещении полностью когерентным ММ излучением для разных частот ν (а–д) и синтезированное многочастотное пространственно-когерентное изображение (е).

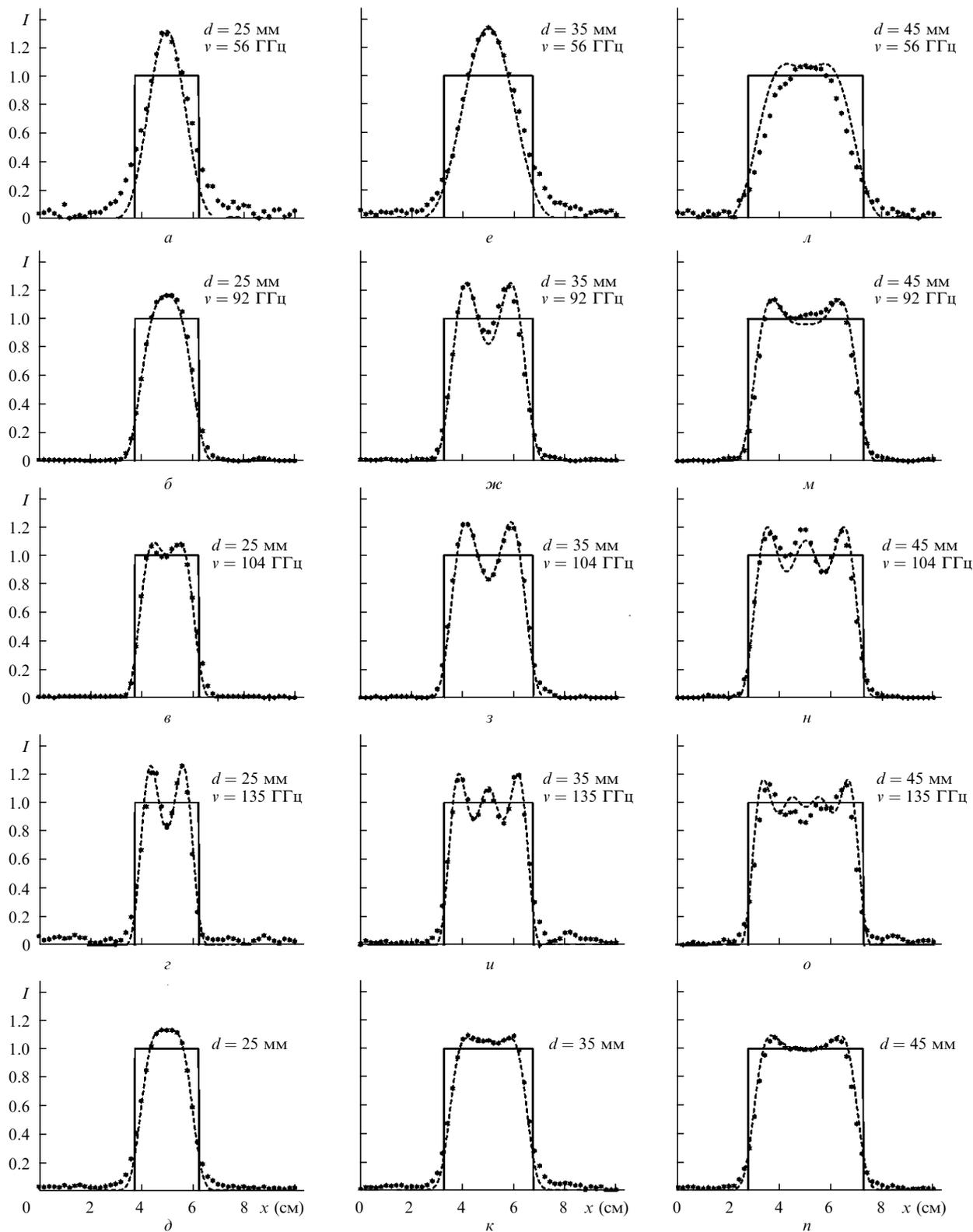


Рис.4. Экспериментальные (точки) и теоретические (штриховая кривая) одномерные распределения интенсивности в изображениях однощелевых объектов с разными ширинами щели d при освещении полностью когерентным излучением для разных частот ($a-e$, $л-о$) и синтезированное многочастотное пространственно-когерентные изображения для соответствующих объектов ($д, к, п$).

тельность приемной матрицы на разных частотах). Синтезированное изображение, полученное в результате суммарного взвешивания пяти одночастотных изображений, достаточно адекватно отображает как пространственную структуру, так и яркостное распределение в наблюдаемом объекте, хотя и со снижением контраста

по сравнению с одночастотным когерентным изображением на частоте 135 ГГц.

На рис.4 представлены теоретические и экспериментальные результаты визуализации однощелевого объекта, поперечные размеры которого значительно больше дифракционного предела используемой линзы. Стро-

ки изображений на рис.4 соответствуют одночастотным когерентным изображениям (для каждой строки частота подсвечивающего излучения одна и та же, но для разных строк она различна). Нетрудно видеть, что и в этом случае на большинстве изображений наблюдаются ложные «многощелевые объекты», при этом пространственная структура распределения интенсивности в изображениях зависит как от размеров объекта, так и частоты подсвечивающего излучения. Синтезированные изображения, полученные по описанной выше методике, лишены указанных недостатков и достаточно адекватно отображают маскированные объекты. Некоторое несоответствие между объектами и синтезированными изображениями объясняется недостатком полным набором разночастотных изображений для такого класса объектов. Однако даже для пятичастотных синтезированных изображений характер распределения их результирующих сигналов позволяет адекватно судить о коэффициенте пропускания объектов независимо от их поперечных размеров.

На рис.5 представлены результаты формирования изображений двумерного щелевого объекта, выполненного в виде буквы Е, при разных частотах когерентного подсвечивающего излучения. Изображения в левой колонке соответствуют экспериментально полученным данным, в правой – результатам численного моделирования. При этом изображения, находящиеся на одной строке в левой и правой колонках, получены при одной и той же частоте излучения подсветки. Аналогично одно-

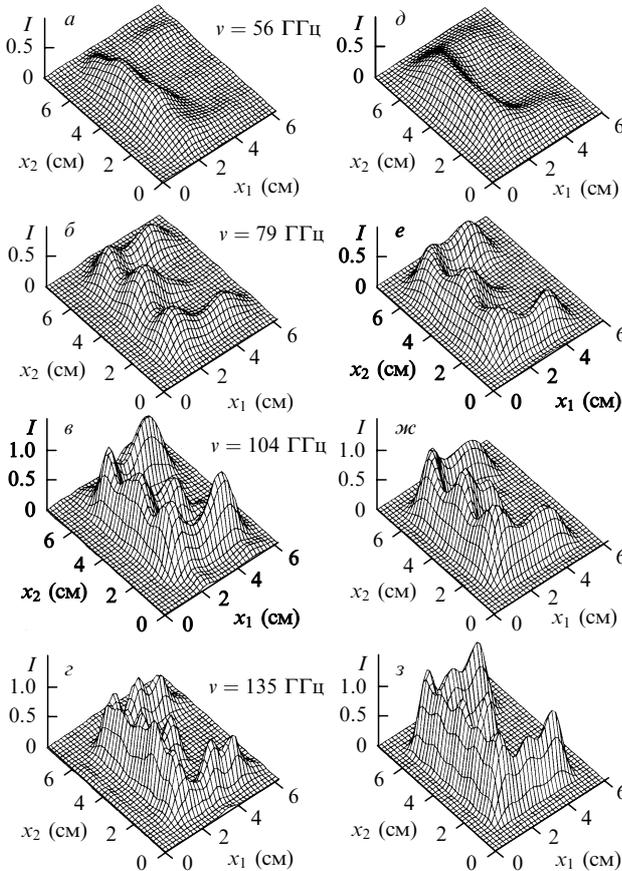


Рис.5. Двумерные распределения интенсивности в изображениях буквы Е, полученные с использованием полностью когерентного излучения на разных частотах ν – экспериментальные данные (а–г) и результаты численного моделирования (д–з).

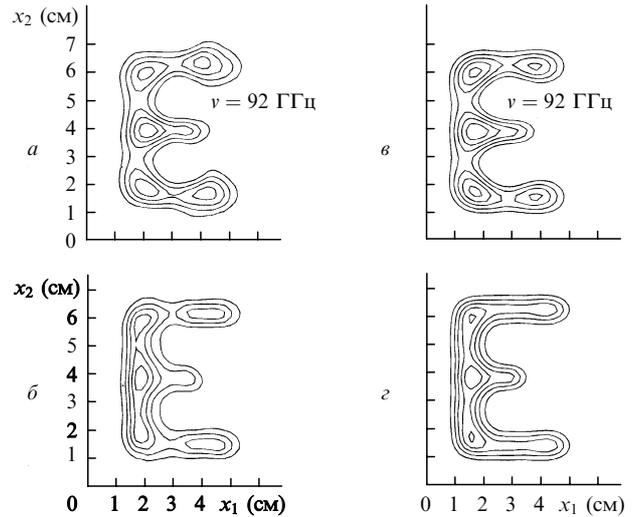


Рис.6. Экспериментальные (а, б) и теоретические (в, з) контурные распределения интенсивности в изображениях буквы Е для одночастотных пространственно-когерентных изображений на частоте 92 ГГц (а, в) и для синтезированных пятичастотных пространственно-когерентных изображений (б, з).

мерным объектам в данных изображениях наблюдаются осцилляции сигнала как в одном, так и в другом измерении. Благодаря тому, что и поперечные и продольные размеры объекта достаточно велики (4.7×3.5 см), четко проявляется зависимость периода колебаний от частоты подсветки в соответствии с формулой (10). При этом амплитуда осцилляций, как и предполагалось, практически одинакова для разных частот. Это позволяет скомпенсировать ложные осцилляции при суммировании таких изображений для получения синтезированного изображения улучшенного качества и повышенного информационного содержания.

Очевидно, благодаря пространственному эффекту Гиббса возникновение ярких пятен, имеющих, как правило, резко выраженную пространственную структуру, будет проявляться в изображениях ММ диапазона совершенно отличным от оптических систем образом. При этом будут возникать ложные яркостные распределения, способные полностью исказить изображение даже в случае полного отсутствия причин для появления когерентных спекл-шумов. Влияние таких искажений усиливается при наличии фона в виде сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, на которой расположен наблюдаемый объект.

На рис.6,б представлено синтезированное изображение, полученное в результате суммирования экспериментальных изображений для частот 56–135 ГГц. На рис.6,з – такое же изображение, полученное синтезом теоретических изображений на тех же частотах (на рис.5 изображения на частоте 92 ГГц не приведены). Для сравнения на рис.6,а и в даны одночастотные изображения для частоты 92 ГГц. Нетрудно заметить существенное улучшение качества в случае синтезированных изображений, в которых значительно уменьшены осцилляционные колебания яркостных сигналов и отсутствуют яркие пятна, характерные для одночастотных изображений.

Рост полосы частот безусловно приведет к дальнейшему улучшению качества синтезированных многочастотных изображений, которое может превысить качест-

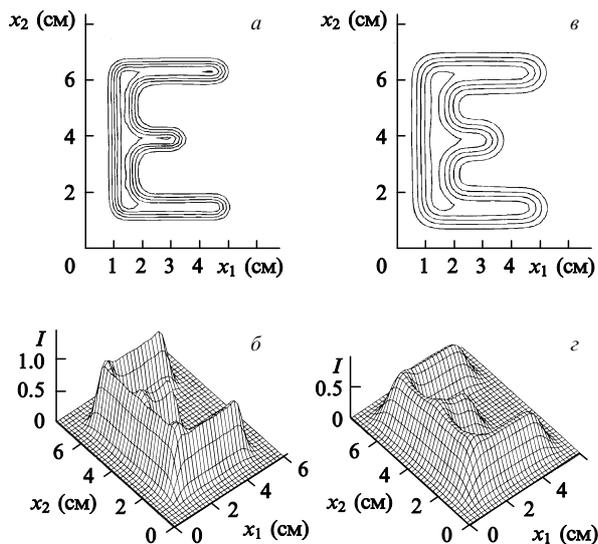


Рис.7. Результаты численного моделирования двух типов изображений буквы Е – синтезированное многочастотное пространственно-когерентное изображение (*а, б*) и монохроматическое пространственно-некогерентное изображение (*в, г*).

во пространственно-некогерентных одночастотных изображениях. Так, на рис.7 представлены результаты численного моделирования синтезированного многочастотного изображения, полученного в полосе частот 70–200 ГГц при накоплении одночастотных когерентных изображений с шагом по частоте 5 ГГц. На рис.7,*в, г* даны результаты численного моделирования изображения, полученного в пространственно-некогерентном излучении на частоте 92 ГГц (в соответствии с формулой (6)). Нетрудно видеть, что характер пространственного распределения яркости практически одинаков для обоих изображений, однако размеры характерных деталей для синтезированного изображения в большей степени соответствуют размерам объекта (другими словами, синтезированное изображение может быть получено с большей четкостью).

Таким образом, принцип накопления многочастотных изображений для получения синтезированного изображения улучшенного визуального качества был теоретически и экспериментально подтвержден для всех рассмотренных объектов. При этом экспериментальные и теоретические данные находятся в хорошем соответствии в рамках погрешностей измерений.

Для иллюстрации практического влияния описанных выше эффектов на возможности идентификации объектов на рис.8 представлены результаты численного моделирования объекта, имеющего сходство формы и характерных размеров деталей с типичными объектами, для наблюдения за которыми и разрабатываются системы формирования изображений ММ диапазона.

Характер распределения яркостных пятен на рис.8,*а* соответствует структуре пятен в экспериментально полученных изображениях реальных пистолетов в работах [3, 4]. При этом особо следует отметить, что в расчетах не учитывались какие-либо факторы, способные привести к спекловым разрушениям изображений, хотя структура распределения интенсивности на рис.8,*а* имеет вид спекловых изображений. Правильное понимание причин искажения изображений реальных объектов позволяет

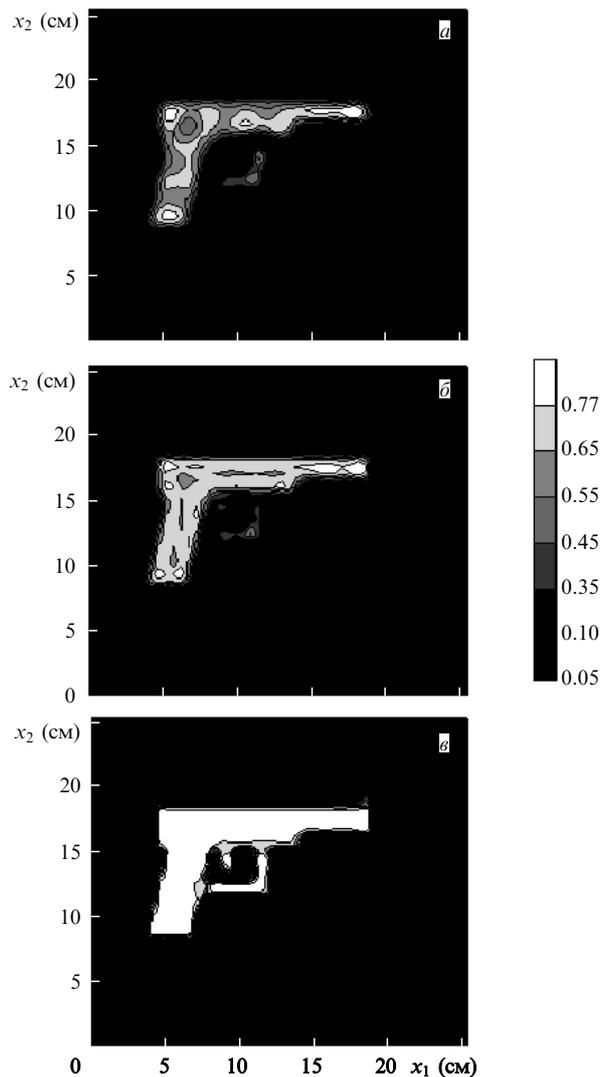


Рис.8. Численное моделирование изображений модельного объекта: одночастотное когерентное изображение на частоте 70 ГГц (*а*), синтезированное пятичастотное изображение для набора частот 68, 76, 84, 92 и 100 ГГц (*б*) и синтезированное многочастотное изображение в диапазоне 68–268 ГГц с частотным шагом 10 ГГц (*в*).

разрабатывать соответствующие решения для их преодоления. Одним из таких решений может быть применение предложенного многочастотного синтеза изображений в ММ диапазоне. Синтезированное изображение на рис.8,*б*, составленное только из пяти одночастотных изображений, имеет уже существенно улучшенное качество. Рис.8,*в* позволяет адекватно оценивать соответствующий объект, что имело место и для ранее рассмотренных объектов (как в эксперименте, так и в численном моделировании).

Очевидно, что многочастотный синтез позволит редуцировать так же эффективно и уровень спекловых шумов, возникающих в когерентных изображениях объектов с шероховатой или неоднородной поверхностью. Это связано с тем, что структура спеклов (авантюриновых пятен) в одночастотных изображениях, полученных для существенно различных частот, будет иметь статистически различные пространственные распределения, что и обусловит взаимное подавление таких пятен в результирующем синтезированном изображении при дол-

жном выборе полосы и сетки частот подсвечивающего объект излучения.

1. Yujiri P.L., Fornaca S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3378**, 14 (1998).
2. Kuroda R.T., Dow G.S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3378**, 57 (1998).
3. Lluukanen At., Viitanen V.-P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3378**, 36 (1998).
4. Goldsmith P.F., Hsieh C.T., Huguenin G.R., et al. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, **41**, 1664 (1993).
5. *Экспериментальная радиооптика*. Под ред. В.А.Зверева, Н.С.Степанова (М.: Наука, 1979).
6. Волков Л.В., Тихомиров С.А. *Радиотехника и электроника*, № 3, 513 (1994).
7. Volkov L.V., Voronko A.I., Tikhomirov S.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2558**, 421 (1995).
8. Volkov L.V., Lyubchenko V.E., Tikhomirov S.A. *Proc. of the Intern. Conf. on Computational Electromagnetic and its Applications (IC-CEA'94)* (Beijing, Chine, 1994, pp. 548-551).
9. Перина Я. *Когерентность света* (М.: Мир, 1974).
10. Волков Л.В., Ларкин А.И. *Квантовая электроника*, **21**, 375 (1994).
11. Larkin A.I., Volkov L.V. *Proc. III Intern. Conf. of the International Society on Optics Within Life Sciences* (Tokyo, Japan, 1994).
12. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику* (М.: Мир, 1970).
13. Friberg A., Wolf E. *Opt. Acta*, **30**, 1417 (1983).
14. Volkov L.V., Lyubchenko V.E., Tikhomirov S.A. *Proc. III Europ. Gallium Arsenide Applications Symposium (GAAS'94)* (Torino, Italy, 1994, pp.97–100).
15. Volkov L.V., Lyubchenko V.E., Tikhomirov S.A. *III Intern. Conf. on Millimeter Wave and Far-infrared Science and Technology (ICMWFST'94)* (Guangzhou, China, 1994, pp. 355–358).
16. Волков Л.В., Любченко В.Е., Тихомиров С.А. *Радиотехника и электроника*, **40**, 322 (1995).
17. Rebeiz G.M. *Proc. IEEE*, **80**, 1748 (1992).