

В. А. Калошин, В. В. Чапурский

АНАЛИЗ СИСТЕМ РАДИОВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОГОЛОГРАФИИ

Дан краткий обзор известных систем радиовидения и обоснована перспективность их построения на принципах мультистатической радиоголографии (МРГ) с применением неподвижных МИМО антенных решеток (АР). Проанализированы характеристики этих систем и отмечены технологические преимущества метода МРГ, обусловленные возможностью применения разреженных АР с неуправляемыми по фазам антенными элементами. Приведены характерные для метода МРГ размеры и шаг двумерных разреженных АР и теоретические результаты фокусировки радиоизображений в двух частотных диапазонах — сантиметровом (15 ГГц) и субмиллиметровом (350 ГГц) для многоточечного объекта, расположенного на различной дальности от АР.

E-mail: vak@cplire.ru; vchapursky@rslab.ru

Ключевые слова: радиовидение, дискретная радиоголография, мультистатический, МИМО антенна.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области систем ближнего радиовидения (от 1 до 30 м по дальности) в диапазоне длин волн от коротких сантиметров до субмиллиметров с целью создания аппаратуры дистанционного досмотра и выявления скрытых предметов под одеждой. Большинство предлагаемых систем работает в области частот от 26 до 100 ГГц, поскольку миллиметровый диапазон в настоящее время хорошо освоен, и сигналы на данных частотах еще достаточно хорошо, т. е. с небольшим затуханием, проникают под одежду. Экспериментально измеренные различными авторами зависимости затухания радиоволн при прохождении через типовые ткани одежды для частот выше 100 ГГц [1] представлены на рис. 1. На графиках видно, что при длинах волн от 3 до 1 мм, т. е. частотах от 100 до 300 ГГц, затухание радиоволн при прохождении через простые ткани и тонкую кожу можно еще считать приемлемым. Из этих результатов следует, что для частот более 300 ГГц коэффициент прохождения сильно уменьшается, и на частотах около 1 ГГц коэффициент прохождения снижается до величины порядка 0,1 и менее.

Для компенсации потерь, обусловленных прохождением через одежду, возможен отказ от пассивных методов получения радиоизображения (РИ) и применение радиоголографических систем с активным зондирующим сигналом (ЗС). Выбор мощности излучения и

потенциала приемо-передающей системы в целом диктуется необходимой дальностью наблюдения и подбирается рационально с учетом требований по преодолению затухания в воздухе и в одежде.

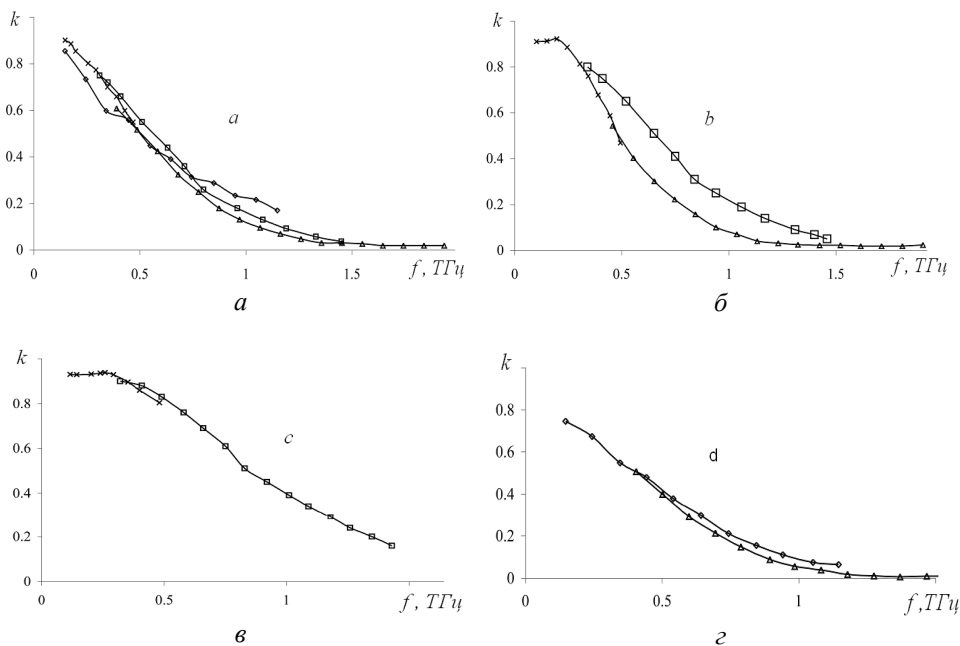


Рис. 1. Прохождение электромагнитной волны через джинсовую ткань (а), шерстяную безрукавку (б), хлопчатобумажную футболку (в) и кожу (г) толщиной 0,75 и 1,3 мм [1]

Наиболее интенсивно исследования в области ближнего радиовидения проводятся в США, где в настоящее время выпускается ряд коммерчески доступных систем. Несмотря на то, что большинство этих систем использует пассивную схему радиовидения [2—4], широкое применение по указанным выше причинам получила и активная система ProVision, разработанная в Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) и работающая в диапазоне 24—30 ГГц [5]. Система использует голографический радар с двумя вертикально расположенными линейными приемо-передающими антенными решетками (АР), механически вращающимися вокруг объекта. Фокусировка по азимуту обеспечивается методом синтеза апертуры. Разрешающая способность РИ — 1 см, время досмотра — несколько секунд. Этой же фирмой разработана аналогичная система, работающая в диапазоне 40...60 ГГц [6]. Согласно работам [5, 6] радиоголографические системы используют заполненные линейные АР с достаточно большим числом элементов (порядка 100) и классический синтез радиоголограмм.

Наиболее высокочастотной из созданных PNNL активных систем радиовидения является субмиллиметровая система [7], работающая в диапазоне 350 ГГц на расстоянии около 10 м. В системе использован квазиоптический радиообъектив на основе эллиптического зеркала. Коническое сканирование луча осуществляется за счет механического вращения плоского зеркала. Общим для всех разработок PNNL является наличие элементов механического сканирования, выбор которого определялся тем, что в альтернативном варианте классической дискретной радиоголографии на основе неподвижных двумерных АР число передающих и приемных элементов АС, шаг которых менее длины волны, оказывается весьма большим. Тем не менее компанией Agilent Technology [8] была разработана и практически реализована активная система с полностью электронным сканированием луча на частоте 24 ГГц. Система содержит полупроводниковый передатчик, двухканальный супергетеродинный цифровой приемник и фазированную антенную отражательную решетку, состоящую из нескольких модулей общей площадью 1 м^2 и содержащую 15 000 элементов с управляемой фазой отраженного сигнала. Решетка является основным и весьма дорогим элементом системы, что существенно увеличило цену всей аппаратуры и сделало эту разработку коммерчески не выгодной.

Таким образом, можно утверждать, что создание систем радиовидения на основе дискретной классической радиоголографии и неподвижных АР, особенно в активном варианте, будет весьма экономически затратным. Прежде всего это относится к диапазону коротких миллиметров и к субмиллиметровому диапазону, который до настоящего времени нельзя считать хорошо освоенным в технико-экономическом отношении. В то же время волны с длиной порядка 1 мм и менее привлекательны тем, что обеспечивают достаточно хорошее разрешение на увеличенных дальностях до объекта при весьма малых размерах апертуры радиообъектива. При регистрации классических дискретных радиоголограмм в активных системах на основе неуправляемых по фазе антенных решеток (АР), состоящих из единых приемо-передающих элементов, шаг элементов должен быть менее длины волны на средней частоте излучения, исходя из требования отсутствия дифракционных максимумов на радиоголограмме, приводящих к искажению РИ. В коротком миллиметровом и тем более в субмиллиметровом диапазоне этот шаг оказывается равным десятым долям миллиметра. Это также приводит к принципиальным трудностям реализации систем радиовидения по методу регистрации классических дискретных радиоголограмм в субмиллиметровом диапазоне волн, несмотря на привлекательность малых размеров АР.

При внедрении систем радиовидения решающее значение имеет себестоимость, которая быстро растет с увеличением рабочей частоты. Это связано, прежде всего, с трудностями реализации дешевых генераторов, маломощных приемников, а также повышенными требованиями к точности изготовления элементов тракта и АР для субмиллиметрового диапазона волн. Преодоление указанных трудностей может быть сопряжено с выбором минимальных частот субмиллиметрового диапазона волн, соответствующих к тому же полосам относительной прозрачности атмосферы, что позволит сократить мощность излучения в активном режиме. Для длин волн около 1 мм и менее данные полосы прозрачности располагаются на частотах, близких к 250 ГГц (длина волны 1,2 мм, затухание в атмосфере 1,8 дБ/км) и около 350 ГГц (длина волны 0,86 мм, затухание в атмосфере 5 дБ/км) [9]. Отметим, что приведенные значения затухания для систем радиовидения с дальностью действия до десятков метров можно считать незначительными.

В соответствии с изложенными обстоятельствами основными задачами данной работы являются анализ новых принципов построения систем радиовидения на основе дискретной мультистатической радиоголографии, характеризующейся применением неподвижных разреженных передающих и приемных АР типа ММО, а также определение их ожидаемых характеристик в традиционных и перспективных диапазонах волн, включая длинноволновую часть субмиллиметрового диапазона.

Алгоритмы фокусировки дискретных мультистатических радиоголограмм. При практической реализации субмиллиметровых систем радиовидения особого внимания заслуживает применение принципов активной мультистатической радиоголографии (МРГ), опубликованных в недавних работах [10—12]. Это обусловлено тем, что для регистрации мультистатических радиоголограмм (МРГ) достаточно использование сравнительно малоэлементной антенной системы (АС), состоящей из существенно разреженных передающей и приемной АР. Принцип МРГ заключается в бистатической регистрации отсчетов рассеянного объектом поля для всех возможных пар «передающий элемент — приемный элемент» данной АС. При числе передающих и приемных элементов соответственно $N_t + 1$ и $N_r + 1$ число всех бистатических пар равно произведению $(N_t + 1)(N_r + 1)$, которое, как правило, является достаточно большим числом. Даже при небольшом общем числе элементов $N_t + N_r + 2$ всегда имеет место неравенство $(N_t + 1)(N_r + 1) \gg N_t + N_r + 2$. Это говорит о том, что число независимых отсчетов поля, от которого напрямую зависит качество РИ, в методе МРГ может быть значительно больше числа отсчетов в классической дискретной радиоголографии при том же общем числе передаю-

щих и приемных элементов. Отсюда вытекает возможность использования в методе МРГ разреженных АС, состоящих из некоторого оптимального числа передающих и приемных элементов. Вследствие неодинакового шага элементов передающей и приемной АР в мультистатической АС в целом происходит подавление дифракционных максимумов модуля системной сигнальной функции, эквивалентной РИ наблюдаемого пространственно-протяженного объекта.

Отмеченные особенности МРГ проявляются в разных диапазонах волн. Поэтому в данной работе при анализе параметров АС и разрешающей способности РИ, полученных при фокусировке МРГ в субмиллиметровом диапазоне 350 ГГц, для сопоставления были дополнительно сфокусированы МРГ одного и того же тестового многоточечного объекта, располагаемого на тех же дальностях, и в хорошо освоенном сантиметровом диапазоне 15 ГГц (длина волны 2 см), естественно, при соответствующем увеличении размеров АС.

Следуя результатам работ [10, 11], приведем использованные в дальнейших расчетах алгоритмы фокусировки дискретных МРГ на основе метода суммы обратных проекций [13]. При получении алгоритмов использовалась геометрия наблюдения точечного объекта или, что эквивалентно, одного локального отражателя p протяженного объекта, представленная на рис. 2. На рисунке показана АС, передающие и приемные элементы которой имеют соответственно номера n и k , вектора координат \mathbf{r}_{tn} , \mathbf{r}_{rk} и размещены в плоскости xOy в количестве $N_t + 1$ и $N_r + 1$.

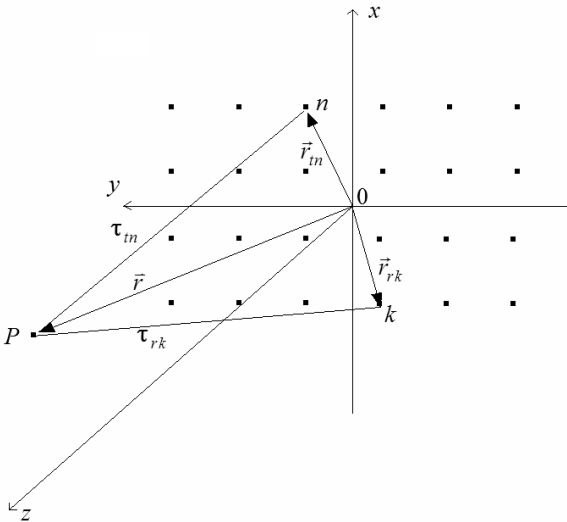


Рис. 2. К пояснению принципа регистрации МРГ

Также предполагалось, что используется сигнал со ступенчатой частотной модуляцией (СЧМ), частотные компоненты которого

$$s_m(t) = A(t - mT_\omega) \exp(j\omega_m(t - mT_\omega)) \quad (1)$$

на каждой m -й частоте ω_m , $m = 0, 1, \dots, M$, имеют одинаковую длительность огибающей $A(t)$ и излучаются в неперекрывающихся по времени интервалах $(mT_\omega, (m+1)T_\omega)$ при различных m , т. е. ортогонально по времени. Работа каждой пары «передающий элемент — приемный элемент» также происходит ортогонально по времени.

Положим, что наблюдаемый объект аппроксимирован совокупностью $P+1$ точечных отражателей с интенсивностями a_p и векторами координат $\mathbf{r}^{(p)}$, $p = 0, 1, \dots, P$. Тогда сигнал m -й частотной компоненты, излученный n -м передающим элементом, отраженный от всех $P+1$ отражателей и принимаемый k -м приемным элементом,

$$v_m(t, k, n) = \sum_{p=0}^P a_p s_m(t - \tau_{n,k}(\mathbf{r}^{(p)})). \quad (2)$$

Здесь $\tau_{n,k}(\mathbf{r})$ — бистатистические задержки распространения сигнала,

$$\tau_{n,k}(\mathbf{r}) = \tau_{ln}(\mathbf{r}) + \tau_{rk}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где τ_{ln} и τ_{rk} — запаздывания сигнала на пути от n -го передающего элемента до точки \mathbf{r} и на пути от точки \mathbf{r} до k -го приемного элемента соответственно:

$$\tau_{ln}(\mathbf{r}) = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ln}| / c; \quad \tau_{rk}(\mathbf{r}) = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{rk}| / c, \quad (4)$$

c — скорость света; $|\mathbf{r}|$ — модуль вектора \mathbf{r} .

С учетом ортогональности по времени импульсов частотных компонент разных частот и интервалов работы пар элементов « $n-k$ » обобщенный корреляционный интеграл фокусировки частотно многоканальной МРГ при СЧМ ЗС в [10] был получен в следующем виде:

$$Q(\mathbf{r}_0) = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \sum_{m=0}^M w_m \exp\{j\omega_m \tau_{n,k}(\mathbf{r}_0)\} \dot{V}_m(n, k). \quad (5)$$

Здесь $\dot{V}_m(n, k) = v_m(t, n, k) \exp(-j\omega_m t)$ — комплексные амплитуды относительно частоты ω_m , образующие дискретную МРГ $\dot{V}_m(n, k)$ по всем n и k на данной частоте ω_m ; w_m — весовые коэффициенты; \mathbf{r}_0 — вектор координат произвольной точки пространства изображения. Для всей когерентной сетки частот ω_m ; совокупность одночастотных МРГ для модели многоточечного объекта (2) имеет вид

$$\dot{V}_m(n, k) = \sum_{p=0}^P a_p \exp \left\{ -j\omega_m \tau_{n,k} \left(\mathbf{r}^{(p)} \right) \right\}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно использовать для моделирования многочастотной дискретной МРГ пространственно-протяженного многоточечного объекта.

В случае СЧМ излучаемых сигналов с постоянным шагом $\Delta\omega$ сетки частот ω_m сумма по m в (5) для модели точечных рассеивателей может быть свернута, и получается выражение для вычисления РИ многоточечного объекта в виде [10]

$$Q(\mathbf{r}_0) = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \sum_{p=0}^P a_p \exp \left\{ j(\omega_0 + M \Delta\omega/2) \Delta\tau_{k,n} \left(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}^{(p)} \right) \right\} W \left(\Delta\omega \Delta\tau_{k,n} \left(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}^{(p)} \right) \right). \quad (7)$$

Здесь $\Delta\tau_{k,n}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}^{(p)}) = \tau_{n,k}(\mathbf{r}_0) - \tau_{n,k}(\mathbf{r}^{(p)})$; $W(x)$ — дискретное преобразование Фурье функции окна w_m . Для обобщенного окна Хэмминга $W(x)$ имеет аналитическую форму [10].

При излучении импульсов на одной частоте $M = 0$, и алгоритм (5) преобразуется к следующему виду:

$$Q(\mathbf{r}_0) = \sum_{n,k=0}^{N_t, N_r} \exp \left\{ j\omega_0 \tau_{n,k} \left(\mathbf{r}_0 \right) \right\} \dot{V}_0(n, k). \quad (8)$$

Полученные результаты справедливы и для одиночного точечного объекта при $P = 0$. В этом случае радиоизображение совпадает с обобщенной функцией неопределенности (ОФН) по пространственным координатам, используемой для оценки пространственного разрешения МРГ, а также в ММО радиолокации [14].

Сравнительные результаты фокусировки МРГ в субмиллиметровом и сантиметровом диапазонах. Геометрия наблюдения тестового многоточечного объекта на удалении z_0 от плоскости АС представлена на рис. 3. Тестовый объект состоит из девяти точечных отражателей, крестообразно расположенных в плоскости параллельной плоскости АС.

Шаг точечных отражателей равен 2,5 см, так что максимальные размеры объекта в двух перпендикулярных направлениях составляют 10 см. Принимавшиеся при расчетах конфигурация и размеры АС субмиллиметрового и сантиметрового диапазонов представлены на рис. 4 в плоскости xOy .

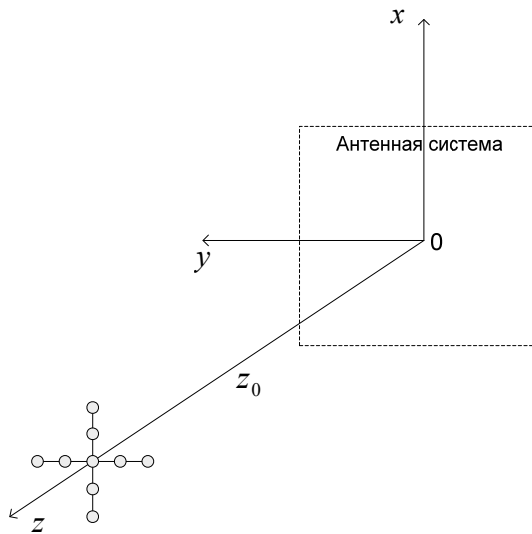


Рис. 3. Геометрия наблюдения тестового многоточечного объекта

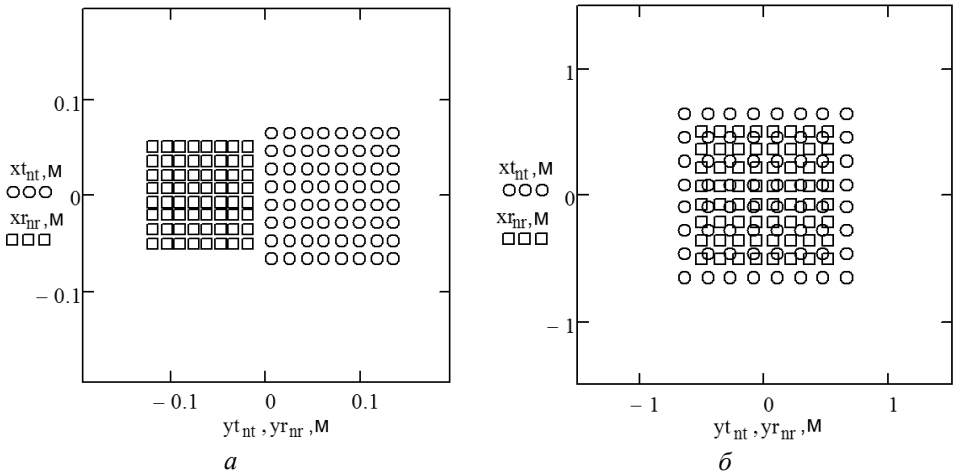


Рис. 4. Конфигурация и размеры АС субмиллиметрового (а) и сантиметрового (б) диапазонов. Масштаб по осям в метрах

В результате предварительных машинных экспериментов по фокусировке МРГ для получения радиоизображения тестового объекта с хорошим разрешением отдельных отражателей были выбраны специальные параметры числа элементов, межэлементных расстояний и размеров передающей и приемной АР.

В сантиметровом диапазоне размеры эквидистантных передающей и приемной АР при одинаковом числе их элементов, равном 64, составили соответственно $1,3 \times 1,3 \text{ м}^2$ и $1,0 \times 1,0 \text{ м}^2$, а шаг решеток равнялся 18,6 см и 14,3 см. Таким образом шаг во много раз превосходил среднюю длину волны излучения в диапазоне частот зондирующего

СЧМ сигнала от 15 до 20 ГГц, т. е. АР были существенно разреженными. Вследствие большой разреженности АР в качестве основного варианта было выбрано моностатическое расположение передающей и приемной АР в пространстве (рис. 4, б), при котором передающие и приемные элементы могли располагаться на общей области плоскости, не совпадая друг с другом. Однако практически те же результаты фокусировки получались и при небольшом бистатическом разnose АР, при котором технически достигается больший уровень развязки передающих и приемных элементов.

В субмиллиметровом диапазоне был выбран вариант бистатического расположения передающей и приемной АР (рис. 4, а), поскольку он технологически более прост в реализации и обеспечивает большую развязку прием-передача. Размеры эквидистантных разреженных передающей и приемной АР при одинаковом числе их элементов, равном 64, составили соответственно $13 \times 13 \text{ см}^2$ и $10 \times 10 \text{ см}^2$, габаритные размеры АС — $13 \times 25,5 \text{ см}^2$, шаг решеток — 1,86 см и 1,43 см (в первом подварианте расчетов). Во втором подварианте расчетов все линейные размеры и шаг АР были увеличены в 2 раза. Таким образом, в обоих подвариантах шаг АР во много раз превосходил среднюю длину волны излучения в принятом диапазоне частот зондирующего СЧМ сигнала от 350 до 385 ГГц, т. е. при относительной полосе частот сигнала около 10%. Степень разреженности решеток при этом в субмиллиметровом диапазоне оказалась значительно большей, чем в сантиметровом, а размеры решеток были уменьшены по сравнению с вариантом сантиметрового диапазона для двух субмиллиметровых подвариантов соответственно в 10 и 5 раз, в то время, как средняя длина волны уменьшилась в 21 раз.

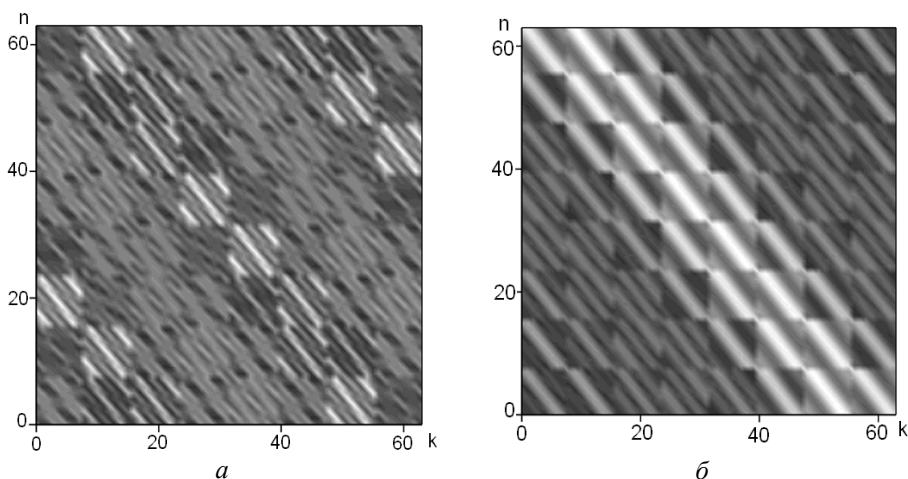


Рис. 5. Топографические диаграммы модулей одночастотных МРГ симметричного крестообразного объекта на частотах 350 ГГц (а) и 15 ГГц (б)

На рисунке 5 представлены модули $|\dot{V}_0(n, k)|$ одночастотных МРГ (на начальной частотной компоненте ω_0) на плоскости дискретных переменных (n, k) в субмиллиметровом и сантиметровом диапазонах волн для АС, представленных на рис. 4, рассчитанные по формуле (6) и принятой ранее модели крестообразного точечного объекта, расположенного на удалении 2,5 м от АС. Следует отметить, что вид МРГ ни коим образом не напоминает несфокусированное РИ объекта, чем существенно отличается от вида классических радиоголограмм, в которых такое несфокусированное РИ обычно просматривается.

Результаты фокусировки РИ в субмиллиметровом и сантиметровом диапазонах представлены на рис. 6 и 7 соответственно для одночастотных и многочастотных МРГ для двух сравнительно небольших значений дальности до объекта: $z_0 = 1,0$ м и $z_0 = 2,5$ м. В субмиллиметровом диапазоне результаты соответствуют *первому подварианту* размеров АС, изображенному на рис. 4, а. Видно, что в случае одночастотных МРГ (см. рис. 6) разрешающая способность РИ в субмиллиметровом диапазоне почти на порядок выше, чем в сантиметровом, однако на дальности 1,0 м имеют место достаточно интенсивные остатки дифракционных максимумов на РИ. Несимметрия дифракционных лепестков на РИ на рис. 6, а объясняется несимметрией АС на рис. 4, а. Характерно, что с увеличением дальности до 2,5 м остатки дифракционных максимумов уменьшаются и в сантиметровом диапазоне даже выходят из отображаемой области РИ. При этом разрешение РИ ухудшается, и в сантиметровом диапазоне волн оно падает ниже того предела, который позволяет разрешать соседние точечные отражатели модели объекта.

Для многочастотных МРГ (см. рис. 7) при тех же значениях дальности до объекта остатки дифракционных максимумов оказываются значительно подавленными. Оценка уровня их подавления при дальности до объекта 2,5 м показала, что для многочастотных МРГ в субмиллиметровом диапазоне это подавление составляет менее -30 дБ по отношению к уровню отображения точечных отражателей. Для одночастотной МРГ на той же дальности этот показатель составил порядка -15 дБ. В сантиметровом диапазоне в отображаемой ограниченной области изображения остатки дифракционных максимумов РИ по понятным причинам практически не наблюдаются. При этом в сантиметровом диапазоне волн, как и в случае одночастотного сигнала, разрешение РИ на дальности 2,5 м становится недостаточным для разделения соседних отражателей.

Характерно, что уменьшение полосы частот СЧМ сигнала с 35 до 5 ГГц в субмиллиметровом диапазоне 350 ГГц, т. е. до $\approx 1,4$ %

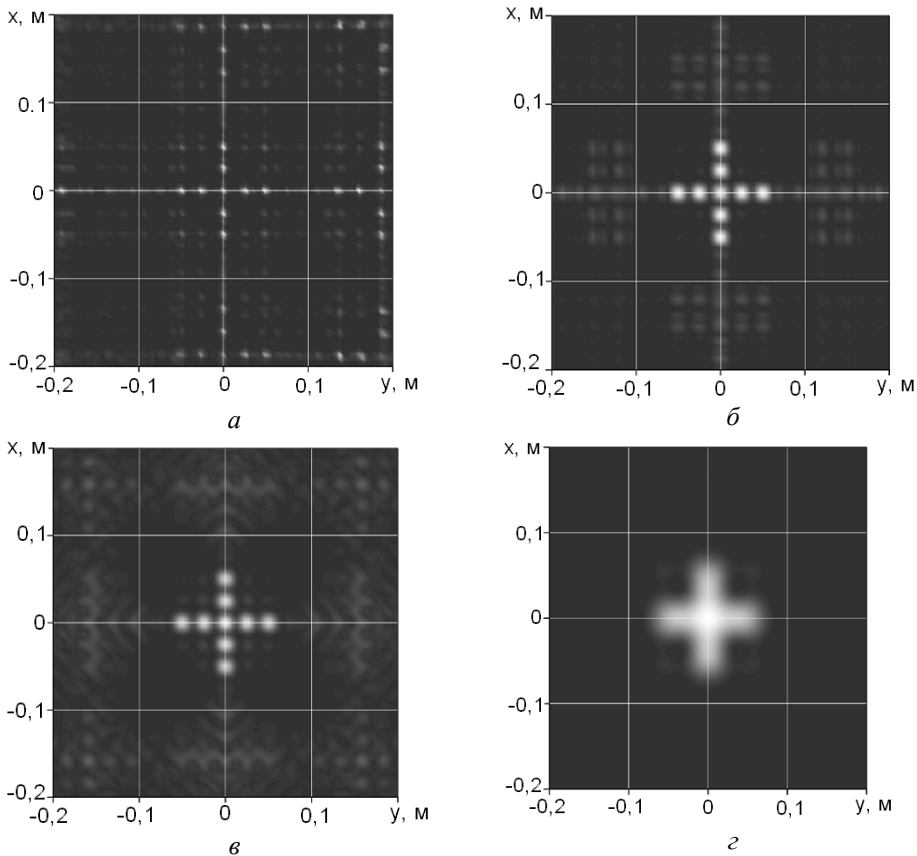


Рис. 6. РИ крестообразного объекта размером 10×10 см при фокусировке одночастотных МРГ на частотах 350 ГГц (*а, б*) и 15 ГГц (*в, г*). Дальности до объекта 1,0 м (*а, в*) и 2,5 м (*б, г*)

средней частоты сигнала, приводит к заметному ухудшению подавления дифракционных максимумов, и они достигают уровня примерно $-14 \dots -15$ дБ относительно уровня сигнала элементарного отражателя.

Несомненный интерес представляет сравнение результатов фокусировки РИ по МРГ в субмиллиметровом и сантиметровом диапазонах при более значительном увеличении дальности до тестового объекта. Такие расчеты проводились при прочих равных условиях для дальностей 4, 5, 6 и 8 м. При этом удовлетворительными по разрешающей способности при одночастотном и многочастотном сигнале можно считать результаты для субмиллиметрового диапазона на дальности до 5 м (рис. 8, *а*), в то время как в сантиметровом диапазоне даже при многочастотном сигнале результат по разрешающей способности на дальности 5 м оказался неудовлетворительным (рис. 8, *б*). Напомним, что полученные для субмиллиметрового диапазона результаты соответствуют отмеченному ранее *первому подварианту* расчетов, когда размеры приемной и передающей АР были малы и составляли 10×10 и 13×13 см² соответственно.

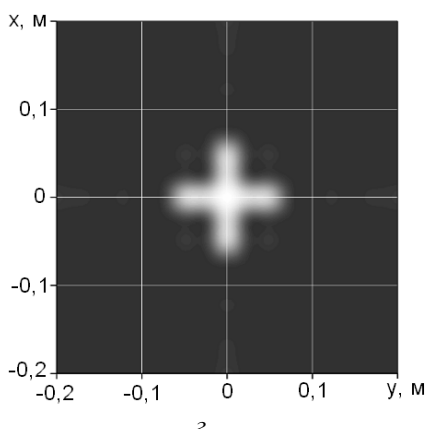
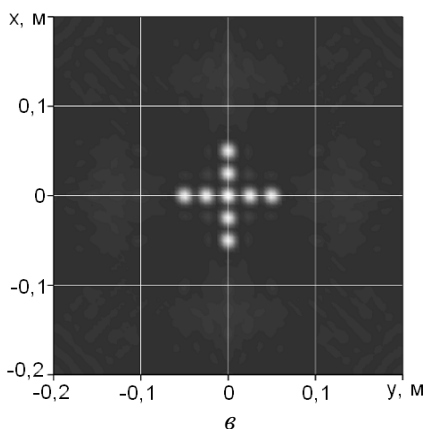
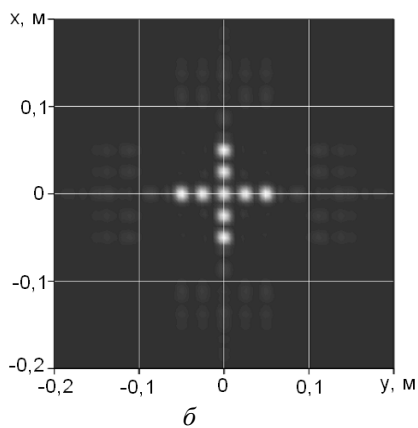
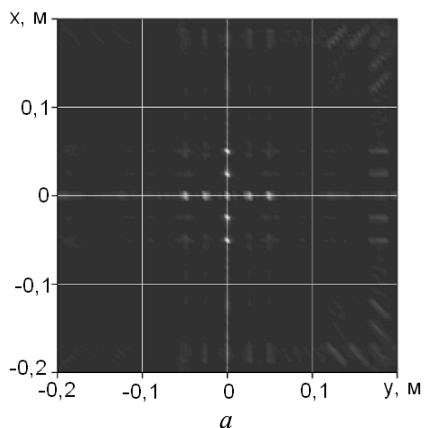


Рис. 7. РИ крестообразного объекта размером 10×10 см при фокусировке многочастотных МРГ на частотах 350...385 ГГц (*a*, *б*) и 15...20 ГГц (*в*, *г*). Дальности до объекта 1,0 м (*a*, *в*) и 2,5 м (*б*, *г*)

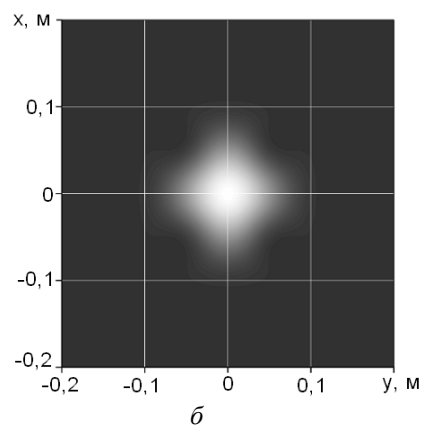
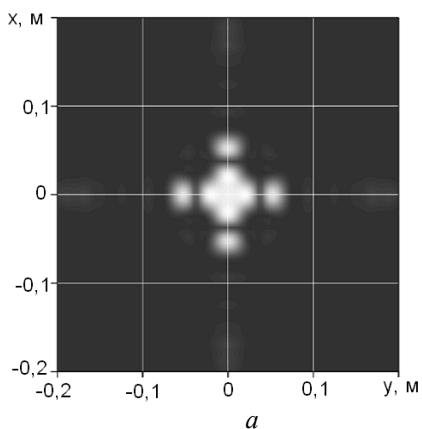


Рис. 8. РИ симметричного крестообразного объекта при фокусировке многочастотных МРГ при начальных частотах 350 ГГц (*a*) и 15 ГГц (*б*). Дальность до объекта 5 м

С увеличением дальности более 6...8 м разрешение существенно ухудшается и в субмиллиметровом диапазоне волн при принятых малых размерах АР по *первому подварианту*, так что перестают разрешаться соседние элементарные отражатели. Данное ухудшение в субмиллиметровом диапазоне может быть скомпенсировано в соответствии со *вторым подвариантом* расчетов, при котором все размеры АС увеличены в 2 раза, т. е. размеры приемной и передающей АР составили 20×20 и 26×26 см² соответственно. В качестве примера на рис. 9 показаны результаты фокусировки МРГ на дальностях 8,0 и 2,5 м для субмиллиметрового диапазона волн при увеличенных по *второму подварианту* в 2 раза размерах АС и прочих равных условиях.

Приведенные на рис. 9 топографические диаграммы РИ хорошо подтверждают ожидаемый результат повышения разрешающей способности РИ, в том числе на увеличенных дальностях при увеличении размеров АС при вполне допустимых, низких уровнях остатков дифракционных максимумов.

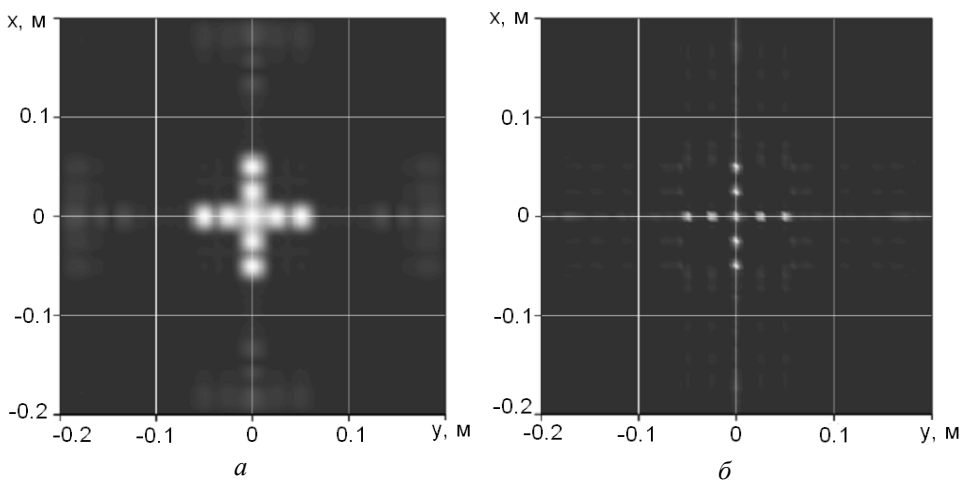


Рис. 9. РИ симметричного крестообразного объекта при фокусировке многочастотной МРГ в субмиллиметровом диапазоне 350...385 ГГц и дальности до объекта 8 м (*а*) и 2,5 м (*б*) при увеличенных в 2 раза размерах бистатической АС по сравнению с рис. 4, *а*

В заключение можно констатировать следующее. Одним из путей решения задач досмотра с дистанционным обнаружением скрытых под одеждой человека предметов является применение радиолографических методов, основанных на использовании активных систем с излучением многочастотных зондирующих сигналов.

Перспективным направлением реализации подобных систем наблюдения может быть использование метода мультистатической радиолографии — МРГ. Данный метод потенциально позволяет в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн создавать си-

стемы радиовидения с высоким разрешением при малых размерах неподвижных разреженных АР и достаточно большом межэлементном расстоянии. При этом в отличие от классической дискретной радиоголографии не потребуется разработки и создания АР с нереализуемо большим числом антенных элементов и критически малыми для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов межэлементными расстояниями. Кроме того метод МРГ может быть осуществлен без применения механического сканирования элементов АС, которая может быть реализована в виде неподвижных разреженных передающей и приемной АР с небольшим числом простых, электрически управляемых по фазам антенных элементов.

Сопоставимая разрешающая способность РИ при методе МРГ достигается в сантиметровом диапазоне и в субмиллиметровом диапазоне для приемной и передающей АР соответственно с числом элементов 8×8 и 8×8 и с размерами $1,3 \times 1,3$ м и $1,0 \times 1,0$ м в диапазоне $15 \dots 20$ ГГц и $0,13 \times 0,13$ м и $0,1 \times 0,1$ м в диапазоне $350 \dots 385$ ГГц. Межэлементные расстояния при этом составляют соответственно 19 и 1,9 см для передающей АР и 14 и 1,4 см для приемной АР. Большая дальность наблюдения при фиксированном разрешении в картинной плоскости может быть получена при увеличении линейных размеров антенной системы субмиллиметрового диапазона примерно в 2 раза без изменения числа передающих и приемных антенных элементов.

Дополнительным преимуществом реализации метода МРГ в субмиллиметровом диапазоне волн является получение радиоизображений с увеличенной разрешающей способностью на существенно больших дальностях, чем в традиционном сантиметровом диапазоне. В частности, для выбранных в настоящей статье условий в субмиллиметровом диапазоне на частотах $350 \dots 385$ ГГц предельные расстояния до объекта при сравнимом качестве РИ оказываются примерно в 3 раза больше, чем в сантиметровом диапазоне частот $15 \dots 20$ ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Appleby R., Wallace H. B. // IEEE Trans. on Anten. and Prop. – 2007. – Vol. 55. – No. 11. – P. 2950.
2. <http://www.thruvision.com>
3. <http://www.millivision.com>
4. <http://www.brijot.com>
5. <http://www.borlassecurity.ru>
6. Mc Makin D. L., Hall T. E., Sheen D. M. Holographic radar imaging privacy techniques utilizing dual-frequency implementation // Proc. SPIE. – 2008. – Vol. 6943. – P. 69430P-1–69430P-10.
7. Sheen D. M. et al. Standoff concealed weapon detection using a 350-GHz radar imaging system // Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7670. – P. 767008-1–767008-10.

8. Corredoura P. et al. // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6211. – P. 69110B-1–69110B-8.
9. Пассивная радиолокация объектов / Под ред. Р.П. Быстрова и А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2008. – 320 с.
10. Чапурский В. В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа ММО с одночастотным и многочастотным излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2011. – № 4. – С. 72–91.
11. Чапурский В. В. Мультистатическая радиоголография // Труды РНТО им. А.С. Попова. – Вып. IV. – 2011. 4-я Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации, 20–22 сентября 2011 г. – Суздаль. – С. 99–102.
12. Чапурский В. В. Сравнительные аспекты фокусировки классических и мультистатических дискретных радиоголограмм // Доклады V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 21–25 ноября 2011 г. – С. 100–104.
13. Курякша А. А. Алгоритм обратной проекции в задачах восстановления пространственного распределения источников волн // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т. 47. – № 12. – С. 1484–1489.
14. MIMO Radar: An Idea whose Time has come / E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum et al. // Proceedings of the IEEE Radar Conference. 26–29 April 2004. – P. 71–78.

Статья поступила в редакцию 07.09.2012