

УДК 621. 396. 96

АДАПТИВНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И.В. Барышев¹, Н.Н. Горобец², Н.И. Матюхин²

¹*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского*

«Харьковский авиационный институт», г. Харьков, 61070, ул. Чкалова, 17.

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, 61077, пл. Свободы, 4.*

Поступила в редакцию 15 марта 2010 г

Рассматриваются физические и конструктивные особенности построения радиоголографических информационных систем (РГ ИС) и их адаптивные свойства, которые проявляются при формировании и обработке когерентного волнового поля на передачу и прием. Предлагается метод регистрации радиоголограммы на поверхности произвольной формы и метод адаптации частоты опорного колебания к различным частотам сигнала при кооперативном приеме и к частоте Доплера.

Ключевые слова: радиоголографическое изображение, плоская и неплоская радиоголограмма, объемное изображение объекта, эффект Доплера.

Розглядаються фізичні і конструктивні особливості побудови радіоголографічних інформаційних систем (РГ ІС) і їх адаптивні властивості, які виявляються при формуванні і обробці когерентного хвильового поля на передачу і прийом. Пропонується метод реєстрації радіоголограми на поверхні довільної форми і метод адаптації частоти опорного коливання до різних частот сигналу при кооперативному прийомі і до частоти Доплера.

Ключові слова: радіоголографічне зображення, плоска і неплоска радіоголограма, об'ємне зображення об'єкту, ефект Доплера.

The physical and structural features of construction of the radioholographic informative systems (RG IS) and their adaptive properties which show up at forming and treatment of the coherent wave field on a transmission and reception are examined. The method of registration of radiohologram is offered on the surfaces of arbitrary form and method of adaptation of frequency of supporting oscillation to different frequencies of signal at a cooperative reception and to frequency of Doppler.

Keywords: radioholographic image, flat and unflat radiohologram, by volume image of object, effect of Doppler.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Радиоголографические системы извлечения информации о местоположении удаленных объектов и их форме основаны на пространственной когерентности сигнала и измерении его амплитуды и фазы в разнесенных точках приема. Такие системы являются многопозиционными пространственно-когерентными (МППК). Они строятся на основе применения среднеапертурных (СА), крупноапертурных (КА) и сверхкрупноапертурных (СКА) антенн, которые работают в дифракционной зоне Френеля и требуют голографической обработки поля. Большое число антенных позиций (антенных модулей), их произвольное распределение на поверхности Земли и когерентное объединение позволяют существенно повысить два обобщенных системных параметра локатора, от которых зависят все его системные характеристики. Такими параметрами являются пространственное разрешение и общая энергия зондирующего сигнала. Их увеличение позволяет решить проблемные задачи перспективной радиолокации, которые не решаются с помощью современных локаторов и локаторов ближайшей перспективы – наблюдение больших потоков объектов в условиях сильного противодействия, получение радиоголографического изображения удаленных объектов, наблюдение одиночных объектов в условиях жесткого ограничения временного ресурса (единицы секунд), что характерно для локаторов малой дальности (единицы километров) и др. Физические и технические особенности построения РГ ИС приводят к новым адаптивным свойствам голографического локатора, которыми являются: поиск (путем простого перебора) по угловым координатам и дальности, поиск по частотам принятых сигналов (путем изменения частоты опорного колебания), определение местоположения антенного модуля в пространстве с точностью до $1/6$ длины волны, синхронизация антенных модулей, юстировка общей антенной системы и её автофокусировка, формирование элементарных локаторов из общего антенного ресурса при выполнении отдельных радиолокационных (РЛ) операций, формирование многофункциональных систем при выполнении всех РЛ операций, формировании многолинейных систем при обслуживании потока объектов, применение методов «грубой силы» для подавления активных и пассивных помех, получение радиоизображения объекта, прямое управление системными параметрами (размерами апертуры

элементарных локаторов на прием и передачу и др.), поиск объекта в шаровом секторе при отсутствии целеуказания по угловым координатам и дальности и др.

Для получения объемного радиоизображения наблюдаемого объекта необходимо восстановить по зарегистрированной радиоголограмме изображение в нескольких фокальных плоскостях, соответствующих условным сечениям объекта. Объемное голографическое изображение ещё не получено, поэтому обычно рассматриваются изображения только в одной фокальной плоскости (плоское изображение). В известном методе восстановления изображения объекта по зарегистрированной радиоголограмме предполагается, что антенные позиции, в которых измеряется амплитуда и фаза принятого сигнала, расположены в одной плоскости, а частота опорных колебаний совпадает с несущей частотой сигнала. На самом деле антенные позиции, удаленные друг от друга на большие расстояния, располагаются не в плоскости, а на произвольной поверхности Земли. Частота опорного колебания не совпадает с частотой принятого сигнала. Поэтому возникает необходимость в разработке метода преобразования радиоголограммы, зарегистрированной на произвольной поверхности, в плоскую радиоголограмму и в разработке метода приема сигналов на различных частотах, в том числе и с доплеровской добавкой.

Целью статьи является: рассмотрение адаптивных свойств голографического локатора в общем плане и предложенных методов построения плоской радиоголограммы по зарегистрированной на произвольной поверхности неплоской голограммы и метода оценки влияния эффекта Доплера на качество изображения точечного объекта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим систему координат, применяемую в радио- и оптической голографии при регистрации плоских голограмм и восстановлении по ним изображения объекта (рис. 1). Плоскость $\Pi_1 = (x, y, o)$ называется плоскостью расположения объекта. Амплитудно-фазовое распределение поля, рассеянного объектом и зарегистрированное на плоскости $\Pi_2 = (\mu, \nu, o_1)$, называется радиоголограммой. Поле в плоскости $\Pi_3 = (\xi, \eta, o_2)$ называется восстановленным изображением объекта. Регистрировать радиоголограмму можно на любой поверхности $\Pi_4 = (X, Y, Z, o_3)$ (X, Y, Z, o_3 - некоторая топоцентрическая система координат с началом на поверхности в точке o_3), но в известных методах восстановления изображения объекта оперируют лишь с плоскими голограммами. Поэтому предлагается метод пересчета поверхностной радиоголограммы в плоскостную. Предполагается, что все точки радиоголограммы, зарегистрированной на поверхности (a, b, d) , должны быть спроектированы по правилам проективной геометрии [1] на плоскость (a^*, b^*, d^*) (рис. 1). Местоположение точек регистрации радиоголограммы на поверхности и длина проективных лучей (aa^*, bb^*, dd^*) должны быть определены с точностью до $1/6$ длины волны.

Физическая сущность обработки волнового поля в РГ ИС сводится к следующему. Пусть точечный объект расположен в точке $p \ x, y \in \Pi_1$, а рассматриваемый произвольный элемент апертуры - в точке $p \ \mu, \nu \in \Pi_2$. Тогда на фокальной плоскости найдется третья точка $p \ \xi, \eta \in \Pi_3$, которую называют точкой фокусировки антенной системы (восстановленное изображение точки). Она лежит на продолжении прямой, проходящей через точки $p \ x, y$ и o_1 . Далее, если принять, что по пути от объекта до элемента антенны $R(x, y, \mu, \nu)$ распространяется сферическая расходящаяся волна, а от него до точки фокусировки $r(\mu, \nu, \xi, \eta)$ - сферическая сходящаяся волна, то фазовый набег по пути от объекта до точки фокусировки через любую точку апертуры будет равен нулю. На первом этапе голографической обработки определяется амплитуда и фаза сигнала в каждой точке апертуры антенны $p \ \mu, \nu$, а на втором этапе определяется напряженность поля в каждой точке фокальной плоскости $p \ \xi, \eta$. Будем считать, что объект плоский и облучается когерентным источником с фазовым фронтом, параллельным плоскости объекта. Отражающие свойства объекта описываются двумерной функцией рассеяния $s \ x, y$. Тогда напряженность поля в каждой точке приемной апертуры с точностью до постоянного множителя (C_1) будет определяться выражением [2]:

$$u_{\mu, \nu} = C_1 \iint_{D_1(x, y)} s(x, y) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R_{x, y, \mu, \nu}} dx dy, \quad (1)$$

где $D_1(x, y)$ - функция, описывающая форму объекта в картинной плоскости.

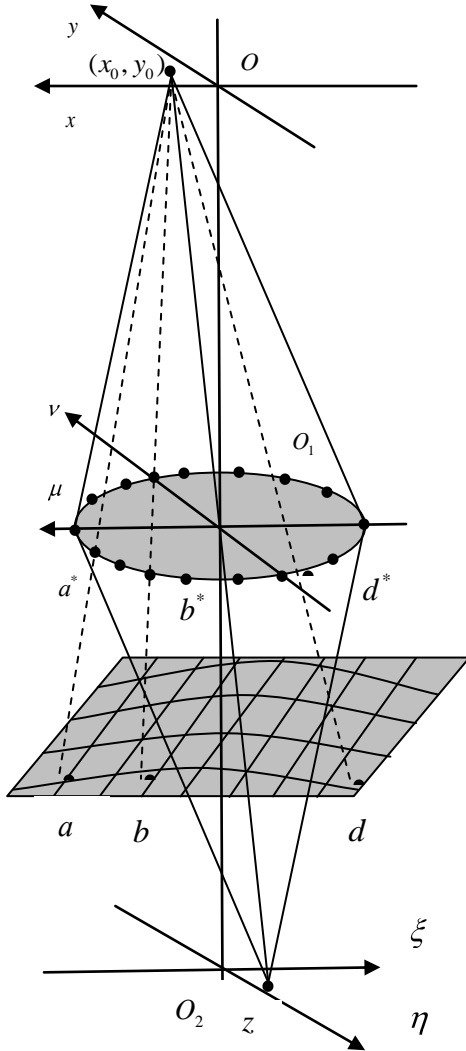


Рис. 1. Схема регистрации радиоголограммы объекта на плоскости и поверхности и восстановление по ним его изображения.

координатам μ и ν .

Обозначим через A_{x_i, y_k} амплитуду сигнала, отраженного от элементарной площадки с центром x_i, y_k и положим $s(x, y) = A(x, y) \delta(x - x_i, y - y_k)$. Тогда, используя (1) и (2), получим приближенные выражения для расчета напряженности волнового поля в дискретных точках плоскости антенны (радиоголограмму Кирхгофа) и в плоскости фокусировки (изображение объекта):

$$u_{\mu, \nu} = C_3 \sum_{i=-i_{\max}-1/2}^{i_{\max}-1/2} \sum_{k=-k_{\max}-1/2}^{k_{\max}-1/2} A_{x_i, y_k} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R_{i, k, n}} \quad (3)$$

$$u_{\xi, \eta} = C_4 \sum_{n=0}^{N-1} u_{\mu, \nu} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_{m, q, n}} \quad (4)$$

где $R_{i, k, n} = R_0 + \mu_n - x_i^2 / 2R_0 + \nu_n - y_k^2 / 2R_0$,

Напряженность поля в произвольной точке плоскости изображения Π_3 с точностью до постоянного множителя C_2 определяется выражением:

$$u_{\xi, \eta} = C_2 \iint_{D_2(\mu, \nu)} u_{\mu, \nu} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_{\mu, \nu, \xi, \eta}} d\mu d\nu, \quad (2)$$

где $D_2(\mu, \nu)$ - функция, описывающая форму приемной апертуры антенны. Знак «-» указывает на то, что используется сферическая сходящаяся волна.

Представим протяженный объект в виде совокупности элементарных площадок ($dx dy$), каждая из которых рассматривается как точечный рассеивающий элемент («блестящая точка»). Ее размеры определяются линейной пространственной разрешающей способностью антенной системы голографического локатора. Координаты центров элементарных площадок обозначим через (x_i, y_k) , где $x_i = \Delta x i$, $y_k = \Delta y k$, $i = -i_{\max} - 1/2, \dots, i_{\max} - 1/2$, $k = -k_{\max} - 1/2, \dots, k_{\max} - 1/2$, i_{\max}, k_{\max} - заданные величины. Аналогичным образом представим в дискретном виде координаты точек в фокальной плоскости.

Так, $\xi_m = \Delta \xi m$,

$$\eta_q = \Delta \eta q, m = -m_{\max} - 1/2, \dots, m_{\max} - 1/2,$$

$q = -q_{\max} - 1/2, \dots, q_{\max} - 1/2$, где q_{\max}, m_{\max} - заданные величины.

Будем рассматривать антенную систему РГ ИС в виде антенной решетки с равномерным распределением элементов по окружности (рис. 1). Обозначим через N общее число элементов в антенне (антенных модулей). Тогда координаты отдельных элементов антенны будут определяться выражением:

$$\mu_n, \nu_n = \frac{L_{np}}{2} \cos \frac{2\pi}{N} n, \sin \frac{2\pi}{N} n, n = 1, \dots, N, \text{ где}$$

$L_{np} = L_{np, \mu} = L_{np, \nu}, L_{np, \mu}, L_{np, \nu}$ - размеры апертуры по

$r_{m,q,n} = r_0 + \mu_n - \xi_m^2 / 2r_0 + \nu_n - \eta_q^2 / 2r_0$, C_3, C_4 - постоянные величины.

В частном случае, когда объект точечный ($i_{\max} = k_{\max} = 0$) или рассматривается только один отражающий элемент протяженного объекта, модуль комплексного выражения (4) определяет диаграмму направленности или парциальную диаграмму направленности антенны на прием:

$$|u_{\xi_m, \eta_q}| = \left(\left[\operatorname{Re} u_{\xi_m, \eta_q} \right]^2 + \left[\operatorname{Im} u_{\xi_m, \eta_q} \right]^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Формулы (3-5) можно использовать для оценки ошибок в определении диаграмм направленности антенны, которые возникают при пересчете пространственных радиоголограмм в плоские в зависимости от ошибок целеуказания по наблюдаемому объекту и от ошибок в определении местоположения антенной позиции на поверхности Земли..

РГ ИС представляет собой поисково-измерительную адаптивную систему. Так же как и в

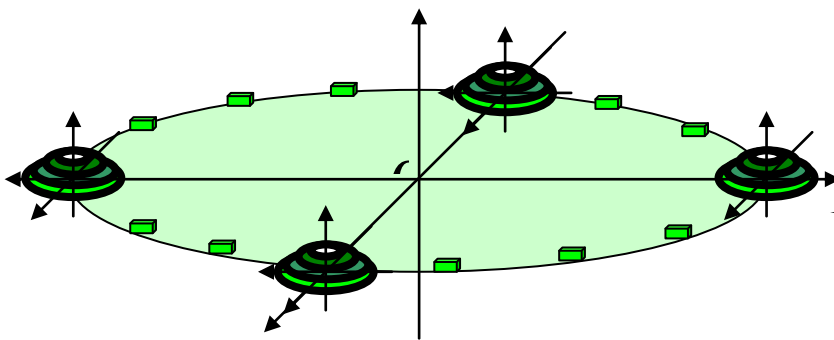


Рис. 2. РГ ИС с горизонтально расположенной общей антенной и антенными модулями сферической формы, расположенными на отдельных позициях.

оптическом локаторе, формулы для расчета диаграммы направленности антенны остаются справедливыми, если предварительно определено опорное направление (линия oo_1o_2), выбрана на его основе радиоголографическая система координат (рис. 1) и отклонение координат наблюдаемого объекта в плоскости расположения объектов (x, y, O) не превышает

половины размеров апертуры антенны ($\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \leq L/2$). Поэтому вначале необходимо определить опорное направление и сформировать радиоголографическую систему координат (рис. 1). Опорное направление и дальность до объекта определяются либо с помощью грубого локатора, либо путем автономного поиска. Последующие опорные направления ($o^l o_1 o_2^l, l = 1, 2, 3, \dots$) определяются в шаровом секторе, охватывающих на круги радиуса (ρ), и для них строится новая радиоголографическая система координат ($x^l y^l o^l; \mu^l \nu^l o_1^l; \xi^l \eta^l o_2^l$) (рис. 1). В автономном режиме радиоголографическая система осуществляет поиск (простой перебор) по опорным направлениям и дальности. При этом горизонтальная плоскость расположения антенных позиций ($\mu \nu o_1$) проектируется на плоскость ($\mu^l \nu^l o_1^l$), нормаль к которой совпадает с опорным направлением. Для общей антенны радиоголографической системы, расположенной в горизонтальной плоскости и создаваемой на основе применения ФАР, наблюдение объекта и поиск опорных направлений (область целеуказания от грубого локатора) может осуществляться в пределах сферического угла 120° . Для наблюдения объекта на малых углах места ($\alpha = 0^\circ \div 30^\circ$) необходимо применять специальные меры. Например, можно применять антенные модули, расположенные на отдельных позициях, в виде малоапертурных сферических антенн с радиусом порядка $L = (3 \div 5) \text{ м}$ (рис. 2). Далее, путем поиска (перебора) определяются отклонения (относительно опорных значений) угловых координат и дальность по каждому объекту ($\xi_k, \eta_k, R_k, k = 1, 2, 3, \dots$), а также отклонения несущих частот и частоты Доплера от частоты опорных колебаний. Частота опорных гармонических колебаний ($f_{\text{опор}}$) выбирается из условия $f_{\text{опор}} = f_0$, где f_0 - несущая частота рассеянного объектом поля. Если, например, осуществляется многочастотный кооперативный прием, при котором облучается объект одновременно на нескольких несущих частотах ($f_i, i = 1, 2, 3, \dots$), а принимается всеми антенными модулями (локаторами одного или различного диапазона волн, расположенными на отдельных антенных позициях) многопозиционной когерентной системы, то в каждом антенном модуле осуществляется поиск по несущим частотам. При этом выполняется условие $f_{\text{опор},i} = f_0 \pm \Delta f_i$, где Δf_i - переменная добавка к опорной частоте. Аналогично осуществляется поиск по

частоте при наблюдении движущегося объекта с учетом доплеровской добавки ($F_{доп.}$) к несущей частоте. Для каждого антенного модуля частота опорных колебаний равна $f_{опор.н} = f_0 + F_{опор.н}$, где $F_{опор.н}$ - частота опорного колебания, которая изменяется при поиске. Рассмотрим только одну фазовую составляющую гармонического колебания в плоскости изображения объекта, связанную с частотой Доплера. В этом случае диаграмма направленности общей антенны радиолокационной системы имеет вид

$$|U(\xi, \eta)| = \left| \sum_{n=1}^N A_n e^{-j \frac{2\pi}{C} (f_0 + F_{доп.н}) \sqrt{R_0^2 + (\mu - x_0)^2 + (v - y_0)^2} - (f_0 + F_{опор.н}) \sqrt{f_0^2 + (\mu - \xi)^2 + (v - \eta)^2}} \right|, \quad (6)$$

где A_n - амплитуда сигнала в n -ом модуле, $R_0 = \overline{OO_1}$, C - скорость света.

РГ ИС и комплексы потребления информации условно можно разделить по дальности действия и размерам апертур антенны на три вида: ближнего радиуса действия, создаваемые на основе применения СА антенн ($R = (100 \div 5 \cdot 10^3) м$, $L = (5 \div 15) м$); среднего радиуса действия, создаваемые на основе применения КА антенн ($R = (5 \div 30) 10^3 м$, $L = 15 \cdot 10^3 м$) и большого радиуса действия, создаваемые на основе применения СКА антенн ($R = (30 \div 3000) \cdot 10^3 м$, $L = 3000 \cdot 10^3 м$). Информационные системы среднего радиуса действия осуществляют наблюдение аэродинамических объектов, у которых высота полета $H \leq 30 \cdot 10^3 м$. Дальность прямой видимости при этом с учетом кривизны Земли составляет порядка $R \approx 500 \cdot 10^3 м$. В диапазоне сантиметровых волн ($\lambda = 3 \cdot 10^{-2} м$) на высоте $H = 30 \cdot 10^3 м$ пространственное разрешение составляет $\delta \ell = 0,6 м$, а в метровом диапазоне волн ($\lambda = 1 м$) - порядка $2 м$. Информационные системы большого радиуса действия, создаваемые на основе применения больших антенн, наблюдают космические объекты. Пространственное разрешение при $\lambda = 3 \cdot 10^{-3} м$, $R = 3000 \cdot 10^3 м$, $L = 300 \cdot 10^3 м$ составляет $\delta \ell = 0,3 м$. В таких антеннах расстояние между крайними и противоположными антенными модулями оказываются большим. Поэтому следует ожидать большие различия в доплеровской частоте сигналов, принимаемых крайними модулями. Это относится также и к информационным системам среднего радиуса действия. Если эти различия будут существенными, то следует применять индивидуальный подход к формированию опорных колебаний для антенных модулей.

Найдем выражение для величины угла между двумя направлениями на объект, наблюдаемый с двух произвольных точек, расположенных на антенне. Рассмотрим два вектора \mathbf{A} и \mathbf{B} , соответствующих двум радиальным составляющим скорости объекта, при наблюдении его в точке расположения центра общей антенны (O_1) и в точке расположения произвольного антенного модуля с координатами (μ_n, ν_n) (рис. 1). Воспользуемся определением скалярного произведения двух векторов ($\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$), которое позволяет выразить угол между ними ($\vartheta_{\mathbf{A}, \mathbf{B}}$) через их проекции на оси голографической системы координат (μ, O_1, ν). Так,

$$\cos \vartheta_{\mathbf{A}, \mathbf{B}} = \frac{(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|} = \frac{\mathbf{A}_\mu \mathbf{B}_\mu + \mathbf{A}_\nu \mathbf{B}_\nu + \mathbf{A}_z \mathbf{B}_z}{\sqrt{\mathbf{A}_\mu^2 + \mathbf{A}_\nu^2 + \mathbf{A}_z^2} \sqrt{\mathbf{B}_\mu^2 + \mathbf{B}_\nu^2 + \mathbf{B}_z^2}} = \frac{R_0}{\sqrt{\mu_n^2 + \nu_n^2 + R_0^2}}, \quad (7)$$

где $\mathbf{A} = \|\mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_\nu \mathbf{A}_z\|$, $\mathbf{B} = \|\mathbf{B}_\mu \mathbf{B}_\nu \mathbf{B}_z\|$, $\mathbf{A}_\mu = 0$, $\mathbf{A}_\nu = 0$, $\mathbf{A}_z = R_0$, $\mathbf{B}_\mu = \mu_n$, $\mathbf{B}_\nu = \nu_n$, $\mathbf{B}_z = R_0$.

Доплеровская частота для антенного модуля с координатами (μ_n, ν_n) будет равна $F_{доп.н} = F_{доп.А} \cos \vartheta_{\mathbf{A}, \mathbf{B}}$, где $F_{доп.А}$ - доплеровская частота для антенного модуля, расположенного в центре антенны. Расчеты по формуле (7) показывают, что для информационных систем среднего и большого радиуса действия на предельных дальностях угол между двумя направлениями на объект, соответствующих двум рассматриваемым векторам (\mathbf{A} и \mathbf{B}), не превышает трех угловых градусов ($\vartheta_{\mathbf{A}, \mathbf{B}} \leq 3^\circ$). Для таких информационных систем и для предельных дальностей не требуется автономного поиска по доплеровской частоте. В общем случае необходимо проводить оценки по формулам (6) и (7).

Оценим теперь влияние эффекта Доплера на качество изображения точечного объекта. Для этого воспользуемся выражением для диаграммы направленности антенны (6). Ограничимся оценкой влияния эффекта Доплера в одной точке - в направлении на объект. По существу рассмотрим влияния частоты

Доплера на коэффициент направленного действия (КНД) антенны. Обозначим через (Π_δ) отношение добавки к частоте опорного колебания к частоте Доплера $(\Pi_\delta = \frac{F_{опор.n}}{F_{доп.n}})$. Назовем его коэффициентом адаптации опорной частоты к частоте Доплера. Тогда из (6) следует

$$\left| U(\xi, \eta) \Big|_{\xi=x_0, \eta=y_0, R_0=r_0} \right| = \left| \sum_{n=1}^N A_n e^{-j \frac{2\pi}{C} F_{доп.n} (1-\Pi_\delta) \sqrt{R_0^2 + (\mu-x_0)^2 + (\nu-y_0)^2}} \right|. \quad (8)$$

Графики зависимости КНД антенны РГ ИС с учетом (8) от коэффициента адаптации по доплеровской частоте для информационных систем большой и средней дальностей и соответственно для сантиметрового и метрового диапазонов приведен на рис 3. Из графиков видно, что в сантиметровом диапазоне волн эффект Доплера оказывает существенное влияние на качество изображения объекта. В метровом диапазоне волн, наоборот, он практически не влияет.

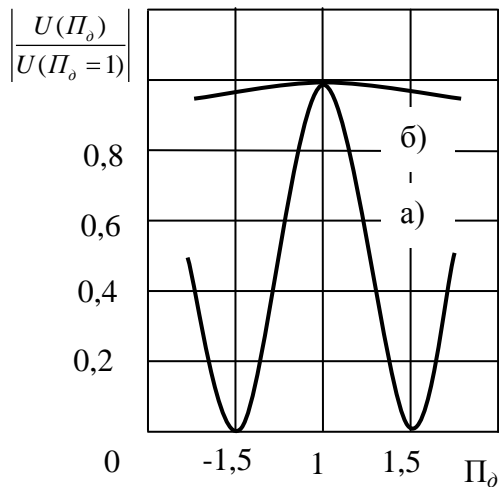


Рис. 3. Изменение КНД общей антенны РГ ИС от коэффициента адаптации по доплеровской частоте для сантиметрового (а) и метрового (б) диапазонов волн.

плоскости изображения объекта можно производить для всех антенных модулей в одинаковой мере.

3. В общем случае на неопределенных дальностях компенсацию доплеровской частоты следует выполнять для каждого антенного модуля в отдельности.

4. В системах сантиметрового диапазона волн влияние эффекта Доплера оказывает существенное влияние на качество изображения объекта.

5. В системах метрового диапазона волн, наоборот, влияние эффекта Доплера оказывается незначительным.

ВЫВОДЫ

1. РГ ИС является динамической и адаптивной системой, способной анализировать состояние внешней среды и изменять свое состояние по нескольким системным параметрам: опорным направлениям и дальности, пространственным координатам объекта (угловые направления и дальность), частоте опорных колебаний при многочастотном кооперативном приеме и наличии доплеровской добавки, начальной фазе сигнала на передачу и прием и др.

2. Для информационных систем большой и средней дальности на предельных дальностях антенные модули практически не отличаются по доплеровской добавке к несущей частоте рассеянного поля. Поэтому компенсация доплеровской добавки в

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии / П.С. Александров. - М.: Наука, 1968. - 910 с.
2. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1970. - 720 с.