

УДК 621.319.26

В.К. Клочко**АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ ДОПЛЕРОВСКОЙ РЛС**

Предложен алгоритм формирования трехмерного радиоизображения поверхности и объектов на поверхности с повышенным разрешением по угловым координатам.

Введение. Формирование трехмерного радиоизображения (РИ) поверхности с высотными объектами на поверхности с помощью бортовой РЛС необходимо для повышения безопасности маловысотных полетов вдоль местности со сложным рельефом поверхности, городских и промышленных застроек, линий электропередач, при посадке на аэродром, а также для распознавания объектов на РИ. При этом актуальна проблема повышения разрешающей способности РИ по угловым координатам. Ниже предложен алгоритм формирования трехмерного РИ поверхности и объектов на поверхности с повышенным разрешением по угловым координатам.

Алгоритм формирования трехмерного радиоизображения. Рассмотрим алгоритм формирования трехмерного изображения поверхности по данным бортовой импульсно-доплеровской РЛС с электронным сканированием луча, который основан на методике [1] определения координат доплеровских элементов разрешения (ДЭР) и заключается в следующем.

Алгоритм 1

1. За счет быстрого электронного переключения луч РЛС смещается по азимуту и углу места построчно на ширину диаграммы направленности антенны (ДНА) в зоне обзора.

2. При каждом k -м положении луча антенны принятый во времени t отраженный комплексный сигнал $\dot{S}_k(t)$ селектируется в i -х элементах разрешения по дальности, т.е. из сигнала выбираются i -е составляющие $\dot{S}_{ik}(t)$, соответствующие последовательности элементов разрешения по дальности: $i = \overline{1, m}$, где m – число таких элементов в зоне обзора.

3. В каждом i -м элементе дальности сигнал $\dot{S}_{ik}(t)$ селектируется по доплеровской частоте f_j в j -х узкополосных фильтрах, т.е. из сигнала выбираются j -е составляющие $\dot{S}_{ijk}(t)$, соответствующие последовательности элементов разре-

шения по частоте: $j = \overline{1, n}$, где n – число таких фильтров.

4. Последовательность j -х элементов разрешения по частоте f_j ставится в соответствие последовательности j -х углов α_j отклонения луча отраженного сигнала от вектора \vec{v} путевой скорости движения носителя РЛС, причем частота f_j связана с углом α_j следующей зависимостью [2, с. 273]:

$$f_j = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha_j, \quad (1)$$

где v – путевая скорость движения объекта носителя; λ – длина волны РЛС.

Доплеровский i, j -й элемент разрешения геометрически образуется пересечением конической поверхности ДНА сферическими поверхностями уровня дальности и коническими поверхностями уровня угла α и представляет собой узкий пространственно-протяженный по углам элемент, рассекающий ДНА по линии ДЭР. Уравнение линии ДЭР, соответствующей углу α_j , имеет вид [1]:

$$\cos \varphi \cos \theta = \cos \alpha_j, \quad (2)$$

где φ, θ – угловые координаты точки, принадлежащей ДЭР, в системе координат носителя РЛС.

5. Результатом пересечения i, j, k -го ДЭР (при k -м положении луча) с поверхностью является элементарный i, j, k -й участок поверхности (подобный точечному объекту), вызывающий отраженный сигнал $\dot{S}_{ijk}(t)$. Для сигнала $\dot{S}_{ijk}(t)$, выделенного в i -м элементе дальности и j -м фильтре доплеровских частот, измеряется амплитуда $A(i, j, k)$.

6. Если амплитуда $A(i, j, k)$ превышает порог обнаружения (соответствует отражению от элемента поверхности или объекта в данном ДЭР), то для всех i, j, k -х элементов дискретизации сферической системы координат R, φ, θ или для всех i, j, k -х элементов дискретизации прямо-

угольной системы x, y, z , расположенных в i -м элементе дальности в области i, j, k -го ДЭР, запоминается значение амплитуды $A(i, j, k)$. При этом в сферической системе амплитуда запоминается для первых двух координат R, φ (дальность, азимут) в матрице $A_1(i, j, k)$. В прямоугольной системе амплитуда запоминается для первых двух координат (x, y) в матрице $A_1(i_1, j_1, k_1)$. Значение третьей координаты (угла места θ или высоты z) запоминается в матрице $\Theta(i, j, k)$ или $Z(i, j, k)$. Так как возможна многозначность измерения θ или z (для высотных объектов), то в i, j -х элементах запоминается наибольшее значение θ или z .

7. Проверка принадлежности i_1, j_1, k_1 -х элементов дискретизации i, j, k -му ДЭР осуществляется сравнением их координат R, φ, θ с границами ДЭР, которые рассчитываются на основе линейной аппроксимации уравнения (2) и представляются в виде системы неравенств

$$\begin{aligned} R_i - \Delta R / 2 &\leq R \leq R_i + \Delta R / 2, \\ \varphi_{jk} - \Delta \varphi_k &\leq \varphi \leq \varphi_{jk} + \Delta \varphi_k, \\ \theta(\varphi) - \Delta \theta_k &\leq \theta \leq \theta(\varphi) + \Delta \theta_k, \\ \theta(\varphi) &= \theta_{jk} + b_k \cdot (\varphi - \varphi_k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_i, \varphi_{jk}, \theta_{jk}$ – известные сферические координаты центра i, j, k -го ДЭР; $\Delta \varphi_k, \Delta \theta_k, b_k$ – известные для каждого k -го положения луча параметры аппроксимации ДЭР.

8. Указанные операции пп. 2 - 7 повторяются для всех k -х положений луча, тем самым формируются матрицы A, Θ или A, Z , которые представляют трехмерное изображение поверхности в зоне обзора РЛС.

К недостаткам данного алгоритма можно отнести следующее.

1. Использование системы неравенств (3) для описания ДЭР вносит ошибки аппроксимации.

2. Разрешающая способность данного метода по углам определяется размерами узких пространственно-протяженных по углам ДЭР, пересекающих ДНА под определенным углом. Если ДЭР расположены вертикально к плоскости поверхности отражения, то получается плоское изображение поверхности в координатах дальность – азимут, удобное для восприятия, однако точность измерения угла места и высоты при этом определяется шириной ДНА.

3. Если ДЭР расположены под острым углом к плоскости поверхности отражения, то точность измерения угла места и высоты тем выше, чем меньше угол места. Однако наклоненные под малым углом ДЭР в проекции на горизонтальную плоскость занимают несколько элементов дискретизации и дают смазанное изображение

$A_1(i, j, k), \Theta(i, j, k)$ или $A_1(i_1, j_1, k_1), Z(i_1, j_1, k_1)$, причем смазывание тем больше, чем меньше угол наклона.

4. Смазывание изображения может быть частично устранено за счет наклонного сканирования луча РЛС (ДНА) вдоль касательной к линии ДЭР со смещением ДНА по углам на величину элемента дискретизации с последующей алгоритмической обработкой принятых сигналов на основе методики [3], однако при этом возникают динамические ошибки, связанные с изменением координат движущегося носителя РЛС, а также ошибки, связанные с флуктуацией фазы отраженного сигнала при изменении положения антенны.

Для того чтобы устранить смазывание и получить четкое изображение в пределах каждого фиксированного луча, предлагается одновременно осуществлять доплеровское облучение ДНА и измерение угловых координат элементов поверхности в составе ДЭР моноимпульсным методом [4, 5] (физическая идея такого подхода принадлежит В.И. Мойбенко). Использование моноимпульсного метода измерения угловых координат позволяет рассечь узкие пространственно-протяженные ДЭР на более мелкие части.

При этом алгоритм 1 модифицируется следующим образом. Операции пп. 1 - 5 алгоритма не меняются (ниже они кратко повторяются), операции пп. 6 - 7 меняются: амплитуда присваивается не всем элементам дискретизации в области ДЭР как ранее, а только одному элементу, соответствующему точечным оценкам угловых координат, причем одна угловая координата измеряется (оценивается) с помощью известных моноимпульсных методов, которые здесь подробно не рассматриваются, а вторая угловая координата для повышения точности оценивания вычисляется на основе уравнения линии ДЭР (2).

Алгоритм 2

1. Положение луча РЛС меняется в телевизионном режиме обзора.

2. При каждом k -м положении луча антенны отраженный сигнал $\dot{S}_k(t)$ селектируется в i -х элементах разрешения по дальности: $\dot{S}_{ik}(t)$, $i = \overline{1, m}$.

3. В каждом i -м элементе дальности сигнал $\dot{S}_{ik}(t)$ селектируется по доплеровской частоте f_j в j -х узкополосных фильтрах: $\dot{S}_{ijk}(t)$, $j = \overline{1, n}$.

4. Последовательность j -х элементов разрешения по частоте ставится в соответствие последовательности j -х углов α_j и на основе (1) вычисляется косинус этого угла:

$$\cos \alpha_j = \frac{\lambda}{2v} f_j. \quad (4)$$

5. Измеряется амплитуда $A(i,j,k)$ сигнала $\dot{S}_{ijk}(t)$, выделенного в i -м элементе дальности, j -м фильтре доплеровских частот при k -м положении луча.

6. Если $A(i,j,k)$ превышает порог обнаружения (соответствует отражению от элемента поверхности), то на основе сигнала $\dot{S}_{ijk}(t)$ моноимпульсным методом измеряется угловая координата (азимут φ или угол места θ в самолетной системе координат) каждого точечного отражателя, находящегося в i,j,k -м ДЭР, а вторая координата для известного косинуса угла α_j вычисляется на основе уравнения (2) линии ДЭР по формуле

$$\theta = \arccos(\cos \alpha_j / \cos \varphi) \quad (5)$$

или $\varphi = \arccos(\cos \alpha_j / \cos \theta)$,

где φ отсчитывается от направления движения носителя, θ – от горизонтальной плоскости движения носителя в самолетной системе координат, причем первая формула в (5) выбирается в том случае, если взятый по модулю угловой коэффициент касательной $b_\theta(k)$, проведенной к линии ДЭР, меньше 1: $|b_\theta(k)| < 1$. В противном случае выбирается вторая формула.

7. Угловой коэффициент $b_\theta(k)$ вычисляется заранее по формуле

$$b_\theta(k) = -\frac{\cos \alpha_k \tan \varphi_k}{\sqrt{\cos^2 \varphi_k - \cos^2 \alpha_k}} \quad (6)$$

для известных угловых координат α_k, φ_k центра ДНА для каждого k -го положения луча.

8. Найденное значение азимута φ округляется до ближайшего значения j_1 -го элемента дискретизации азимута, амплитуда $A(i,j,k)$ запоминается в матрице $A_1(i,j_1)$ в целочисленных координатах дальности и азимута, а значение угла места θ – в матрице $\Theta(i,j_1)$. Незаполненным элементам дискретизации присваивается нулевое значение амплитуды. Если изображение формируется в координатах дальность - доплеровская частота, то элементами дискретизации являются элементы разрешения: $i = i_1, j = j_1$.

9. Операции пп. 2 - 8 повторяются для всех k -х положений луча. В результате формируется трехмерное изображение поверхности в зоне обзора РЛС в виде двумерных матриц A_1 и Θ .

10. Для удобства индикации матрицы A_1 и Θ пересчитываются в матрицу амплитуд $A_1(i_1,j_1)$ и матрицу третьей координаты (высоты) $Z(i_1,j_1)$ в элементах дискретизации i_1,j_1 прямоугольной

сетки координат с запоминанием только максимальной высоты.

Возможны следующие частные случаи применения данного алгоритма.

1. Формирование трехмерного изображения поверхности и высотных объектов на поверхности без сканирования луча для одной фиксированной ДНА ($k=1$). В этом случае угол наклона линий ДЭР к горизонтальной плоскости поверхности выбирается порядка $20^\circ - 30^\circ$ (с угловым коэффициентом 0,3 – 0,5) и моноимпульсным методом измеряется только азимут φ . Угол места θ вычисляется по формуле (5), и абсолютная погрешность вычисления θ оказывается в 2 – 3 раза меньше погрешности измерения азимута.

2. Формирование трехмерного изображения гладкой поверхности (без высотных объектов) в условиях, указанных в п. 1. В этом случае моноимпульсным методом измеряется угол места только одного точечного отражателя – элемента поверхности в составе ДЭР и точность измерения φ возрастает.

3. При полете на малой высоте (при малых значениях угла места θ) приближенно можно считать $\cos \theta \approx 1$ и в соответствии с формулой (2) $\varphi \approx \alpha_j$. В этом случае матрицы изображения формируются в координатах дальность (i) – доплеровская частота (j).

4. При полете на большой высоте матрицы Θ или Z не используются, так как высота рельефа поверхности (и объектов) мала по сравнению с высотой полета. В этом случае на индикацию выдается одна матрица двумерного (плоского) амплитудного изображения в координатах дальность - доплеровская частота.

Вывод уравнения линии ДЭР и анализ точности измерения угловых координат в предлагаемом алгоритме сводятся к следующему.

Первый способ вывода уравнения (2) линии ДЭР с помощью векторного представления и преобразования координат вектора при его повороте изложен в [1]. Второй способ заключается в следующем.

Коническая поверхность постоянного уровня доплеровской частоты f_j (угла α_j) пересекает сферическую поверхность ДНА по линии окружности, какой и является линия ДЭР. Центр данной окружности лежит на оси прямого кругового конуса. По этой же оси направлен вектор \vec{v} путевой скорости движения объекта-носителя.

В самолетной системе координат совместим положительную полуось OX с вектором скорости \vec{v} . Тогда линия ДЭР (линия окружности) без

искажения проецируется по плоскость YOZ. Уравнение окружности с центром в точке O и радиусом r в этой плоскости запишется:

$$y^2 + z^2 = r^2. \quad (7)$$

Установим связь прямоугольных y, z и сферических R, φ, θ координат произвольной точки, лежащей на окружности. Учтем при этом, что θ будем отсчитывать от горизонтальной плоскости XOY. Радиус окружности r выразим через наклонную дальность R и доплеровский угол α :

$$y = R \sin \varphi \cos \theta, \quad z = R \sin \theta, \quad (8)$$

$$r = R \sin \alpha.$$

Подставляя (8) в (7), получим уравнение (2):

$$\sin^2 \varphi \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = \sin^2 \alpha$$

$$\Leftrightarrow (1 - \cos^2 \varphi) \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = \sin^2 \alpha$$

$$\Leftrightarrow \cos^2 \varphi \cos^2 \theta = \cos^2 \alpha$$

$$\Rightarrow \cos \varphi \cos \theta = \cos \alpha,$$

где φ, θ и α – острые углы.

Из (2) следует:

$$\theta = \arccos(\cos \alpha_j / \cos \varphi), \quad (9)$$

где

$$\theta \in [0, 90^0], \quad \alpha \in [0^0, 90^0], \quad \varphi \in (-90^0, 90^0).$$

Угловой коэффициент $b_\theta(k)$ касательной, проведенной к линии ДЭР в точке (φ, θ) , равный тангенсу угла наклона, вычисляется взятием производной от (9) по φ :

$$b_\theta(k) = -\frac{\cos \alpha_j \tan \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi - \cos^2 \alpha_j}}, \quad (10)$$

причем коэффициент $b_\theta(k)$ при каждом k -м положении луча достаточно рассчитать только для координат φ_k, α_k центра ДНА по формуле (6), так как в пределах узкой ДНА (например, $1^0 \times 1,5^0$) линии ДЭР наклонены примерно под одним и тем же углом, и $b_\theta(k)$ слабо зависит от α_j и φ .

Предельная абсолютная погрешность Δ_θ измерения θ связана с абсолютной погрешностью Δ_φ измерения φ линейной зависимостью

$$\Delta_\theta = |b_\theta| \cdot \Delta_\varphi. \quad (11)$$

Следовательно, при $|b_\theta| < 1$ появляется эффект повышения точности определения угла места по формуле (9) по сравнению с точностью измерения азимута моноимпульсным методом. При $|b_\theta| = 0,3 - 0,5$, что соответствует наклону линий ДЭР в ДНА примерно в $20^0 - 30^0$ при выборе соответствующих значений α и φ , точность измерения угла места будет в 2 – 3 раза выше точности измерения азимута.

Высота H точечного отражателя (элемента поверхности или объекта на поверхности) вычисляется:

$$H = h - R \sin \theta, \quad (12)$$

где h – высота полета носителя; R, θ – сферические координаты точки в данном азимутальном направлении. Погрешность измерения высоты составляет

$$\Delta_H = \Delta_h + R |b_\theta \cdot \cos \theta| \Delta_\varphi. \quad (13)$$

Выбор значений b_θ определяется характером поверхности. Для ровной горизонтальной поверхности (например, взлетно-посадочного поля) b_θ может быть меньше 0,3, а эффект повышения точности при этом – более чем в 3 раза. Например, если для $\alpha = 60^0$ измеренное моноимпульсным методом значение азимута составляет $\varphi = -20^0$, то значение угла места, вычисленное по формуле (2), будет равно $\theta = 57,85^0$, а высота элемента поверхности $H = h - 0,847R$. При этом $b_\theta = 0,23$ и достигается эффект повышения точности измерения угла места (по сравнению с моноимпульсным методом) и точности измерения относительной высоты $h - H$ (в сравнении с $b_\theta = 1$) примерно в 4 раза.

Эффект повышения разрешающей способности по углам в модифицированном алгоритме 2 в сравнении с алгоритмом 1 можно оценить следующим образом. Погрешность измерения угла места θ алгоритмом 1 при угловом коэффициенте b_θ порядка 0,3 – 0,5 в 2 – 3 раза меньше ширины ДНА. Погрешность измерения угловой координаты моноимпульсным методом в 5-10 раз меньше ширины ДНА. Следовательно предложенный метод позволяет не менее чем в 2 - 3 раза повысить разрешающую способность по углу θ .

Заключение. Предложенный алгоритм формирования трехмерного изображения поверхности и объектов на поверхности соединяет в себе методы доплеровского облучения, определения координат доплеровских элементов и моноимпульсный метод измерения угловых координат, чем достигается эффект повышения разрешающей способности по угловым координатам по сравнению с известным [1] методом формирования трехмерного РЛИ. Сформированное трехмерное изображение дает возможность наблюдать изображение поверхности и высотных объектов на поверхности с дополнительной информацией о высоте, что повышает безопасность маловысотных полетов и вероятность распознавания объектов на поверхности в условиях отсутствия оптической видимости.

Библиографический список

1. Ключко В.К. Методика определения координат доплеровских элементов разрешения при получении трехмерных изображений поверхности // Автотометрия. 2002. № 6. С. 12 – 20.

2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: "Радиотехника", 2005. 368 с.

3. Клочко В.К. Потенциальные возможности восстановления радиоизображений // Вестник РГРТА. Вып. 19. 2006. С. 10 – 18.

4. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Родзивилов В.А.,

Федоров И.Б., Чернов М.В. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа // Успехи современной радиоэлектроники. 1998, № 2. С. 3 – 17.

5. Жибуртович Н.Ю., Абраменков В.В., Савинов Ю.И., Климов С.А., Чижов А.А. Определение радиолокационной системой с моноимпульсным пеленгатором угловых координат отдельных целей из состава группы // Радиотехника. 2005, № 6. С. 38 – 41.