

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ

УДК 621.396

3D-радиовидение на базе бортовой доплеровской РЛС

В. К. Клочко

д. т. н., Рязанский государственный радиотехнический университет

e-mail: KlochkoVK@mail.ru

Аннотация. Решается задача оценивания пространственных координат рельефа земной поверхности в бортовой доплеровской системе формирования 3D-радиовидения.

Ключевые слова: радиолокация, радиовидение, доплеровская фильтрация, оценки координат, трехмерные изображения

3D-Radio-Vision on the Basis of Onboard Doppler RLS

V. K. Klochko

doctor of engineering science, Ryazan State Radio Engineering University

e-mail: KlochkoVK@mail.ru

Abstract. The problem of estimation of terrestrial surface relief spatial coordinates in onboard Doppler system of 3D-radio-vision formation is solved.

Key words: radar-location, radio-vision, Doppler filtration, estimates of coordinates, three-dimensional images

Физическая постановка задачи

В существующих системах радиовидения на базе бортовой импульсной доплеровской РЛС сантиметрового или миллиметрового диапазона длин волн, работающей в режиме доплеровского «обужения» луча [1], формируется двумерное радиолокационное изображение (2D-РЛИ) земной поверхности в координатах радиальная дальность R_i — доплеровская частота f_j в i -х строках и j -х столбцах матрицы амплитудного РЛИ. Каждый i, j -й элемент матрицы РЛИ представляет собой модуль $|\dot{s}(i, j)|$ комплексного измерения $\dot{s}(i, j)$, полученного на выходе тракта первичной обработки в i -м элементе разрешения дальности на j -й доплеровской частоте. Он образуется вследствие отражения электромагнитной волны в i, j -м пространственном элементе разрешения. Пространственный элемент разрешения имеет протяженность вдоль линии доплеровской частоты f_j (изодопы), на которой расположен элемент отражения земной поверхности. Так как по одному измерению $\dot{s}(i, j)$ невозможно определить пространственные координаты элемента поверхности, то этот элемент относят к плоскости Земли в координатах наклонная дальность R_i — доплеровская частота f_j .

Задача состоит в том, чтобы определить пространственные координаты x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} элементов отражения на каждой j -й изодопе в i -х элементах дальности. Совокупность найденных координат, в дополнение к амплитудному РЛИ $|\dot{s}(i, j)|$, после прохождения специального алгоритма отображения формирует 3D-РЛИ участка земной поверхности.

Среди существующих направлений измерения пространственных координат элементов земной поверхности можно выделить интерферометрический метод, метод сканирования луча антенны по углу места, метод учета радиолокационной тени, метод восстановления полей отражения, а также метод стереопары (последний в основном применяется в оптическом диапазоне). Каждый из указанных методов имеет определенные ограничения по условиям применимости. Также требуется дополнительное время обработки по сравнению с процедурой формирования 2D-РЛИ в доплеровской РЛС.

Предлагаемый метод [2, 3] измерения пространственных координат элементов поверхности

на базе бортовой доплеровской РЛС не требует увеличения времени обработки. Суть метода заключается в получении не одного $\dot{s}(i, j)$, а нескольких комплексных измерений $\dot{s}_q(i, j)$, $q = \overline{1, Q}$ ($Q = 2$ или 4 или 5 в зависимости от режима наблюдения). Это достигается за счет включения нескольких пространственных каналов первичной обработки отраженных сигналов по числу Q приемных элементов антенной решетки (АР), пространственно разнесенных в плоскости одной антенны на сантиметры. Запаздывание или опережение по фазе сигналов, принимаемых в приемных элементах АР, дает информацию о пространственном положении отражающих элементов земной поверхности.

Последовательность обработки сигналов.

Тракт первичной обработки в каждом q -м пространственном канале включает в себя усиление промежуточной частоты, фазовое детектирование, низкочастотную фильтрацию, аналогоцифровое преобразование и стробирование по дальности (во времени t). Запомненная в ОЗУ для каждого i -го элемента дальности R_i , $i = \overline{1, m}$ (m — число элементов дальности), комплексная временная последовательность $\dot{s}_{qi}(t_j)$, $j = \overline{1, N}$ (N — объем выборки) подается на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). На выходе БПФ получается комплексный спектр в выделенной полосе частот в виде частотной последовательности $\dot{s}_{qi}(f_j)$, $j = \overline{1, N}$. Обработка в q -х каналах ведется параллельно (независимо).

Последовательности $\dot{s}_{qi}(f_j)$, $j = \overline{1, N}$, $q = \overline{1, Q}$ подаются на алгоритм выделения спектральных отсчетов, который выделяет n частот f_j , $j = \overline{j_1, j_n}$ ($n < N$, в дальнейшем $j = \overline{1, n}$), на которых получены полезные сигналы отражения от элементов поверхности. Полезные сигналы $\dot{s}_q(i, j) = \dot{s}_{qi}(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$, выделенные на j -й частоте в i -м элементе дальности представляют собой несколько комплексных измерений, соответствующих одному и тому же пространственному элементу разрешения. Эти измерения подаются на вход алгоритма оценивания координат, который в соответствии с тем или иным методом находит оценки искомых координат x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} для каждой пары фиксированных значений i, j в прямоугольной системе координат наблюдателя.

Математическая постановка задачи оценивания координат

Спектральные отсчеты $\dot{s}_q(t_j)$, $q = \overline{1, Q}$ (символ i опустим), подчинены модели:

$$\begin{aligned} \dot{s}_q(f_j) &= \gamma_q \sum_{k=1}^{k_j} U(\varphi_{jk}, \theta_{jk}) G(\varphi_{jk}, \theta_{jk}) \times \\ &\quad \times \exp\{i[(2\pi/\lambda)\delta_q + \xi_q]\} + \dot{p}_q(f_j), \quad (1) \\ k_j &< K, \quad \delta_q(x, y) = (x_q x_{j_k} + y_q y_{j_k})/R, \\ \xi_q &= -(4\pi/\lambda)R_0 + \varepsilon(\varphi, \theta) + \eta_q(f_j), \\ \xi_q &= \xi_q(f_j), \quad \gamma_q = \gamma_q(f_j). \end{aligned}$$

Каждой j -й частоте f_j в (1) соответствуют m_j элементов отражения земной поверхности с координатами центров $x_{j_k}, y_{j_k}, z_{j_k}$, сигналы от которых суммируются. В частном случае, определяющем характер гладкой поверхности, принимается $k_j = 1 \forall j = \overline{1, n}$ и модель (1) упрощается:

$$\begin{aligned} \dot{s}_q(f_j) &= \gamma_q U(\varphi_j, \theta_j) G(\varphi_j, \theta_j) \times \\ &\quad \times \exp\{i[(2\pi/\lambda)\delta_q + \xi_q]\} + \dot{p}_q(f_j), \quad (2) \\ \delta_q(x, y) &= (x_q x + y_q y)/R. \end{aligned}$$

В моделях (1) и (2) используются следующие обозначения: γ_q — мультипликативная погрешность, описывающая амплитудную нестабильность; $U(\varphi, \theta)$ — амплитуда сигнала в координатах азимута φ и угла места θ ; $G(\varphi, \theta)$ — амплитудная характеристика ДНА; i — мнимая единица; λ — длина волны; δ_q — запаздывание или опережение по фазе отраженного сигнала при приеме его в q -м приемном элементе антенны по сравнению с центром антенны, зависящее от искомых координат x, y центра элемента отражения, дальности R и известных координат x_q, y_q центра q -го приемного элемента (величина δ_q получается как отклонение плоского фронта волны, достигшей центра антенны, от центра q -го приемного элемента АР); ξ_q — составляющая фазы, зависящая от R и случайных величин $\varepsilon(\varphi, \theta)$ и $\eta_q(f_j)$, где ε меняет свои значения по равномерному закону на $[0, 2\pi]$ при переходе от одного φ -го, θ -го элемента отражения поверхности к другому, а η_q представляет собой нормальный белый фазовый шум, меняющий свои значения по j и q ;

$\dot{p}_q(f_j)$ — аддитивный комплексный нормальный белый шум.

Искомые координаты x, y, z центра элемента отражения связаны с доплеровской частотой f_j уравнением изодопы при $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$:

$$v_x x + v_y y + v_z z = R(\lambda/2v)f_j, \quad (3)$$

где v — величина скорости носителя РЛС; v_x, v_y, v_z — координаты орта \mathbf{v}^0 вектора скорости \mathbf{v} . Для узкой ДНА в (3) принимается $z \approx R$ и (3) упрощается:

$$v_x x + v_y y = c_j, \quad c_j = R[(\lambda/2v)f_j - v_z]. \quad (4)$$

Из (4) вытекают практически важные случаи переднебокового обзора, когда $\mathbf{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$, и координата x определяется доплеровской частотой $x = c_j/v_x$, а также передненижнего обзора, когда $\mathbf{v}^0 = (0, v_y, v_z)$ и $y = c_j/v_z$.

Математически задача заключается в нахождении оценок $\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij}$ координат x, y, z центров элементов отражения поверхности независимо в каждом i -м элементе разрешения дальности ($i = \overline{1, m}$) на j -й доплеровской частоте ($j = \overline{1, n}$) на основе совокупности Q комплексных измерений $\dot{s}_{qi}(f_j)$, $j = \overline{1, N}$, $q = \overline{1, Q}$ и моделей (1), (2).

Характеристика точности оценивания. В моделях (1), (2) элементы отражения рассматриваются как элементарные отражатели — точки в пространстве. Поэтому точность оценок $\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij}$ характеризуется евклидовым расстоянием между точкой $M(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ — центром i -го, j -го элемента отражения — и найденной точкой $\widehat{M}(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij})$, которое принимается за ошибку оценивания: $\Delta = \|M - \widehat{M}\|$. В статистическом смысле мерой точности будут средняя ошибка Δ_{cp} , СКО ошибки σ_Δ и доверительный интервал ошибок.

Алгоритмы решения задачи. Изучались несколько методов оценивания координат: моноимпульсный метод, фазовый метод, метод восстановления комплексных амплитуд поля отражения и метод максимума амплитуды. Предпочтение было отдано фазовому методу и методу максимума амплитуды как наиболее точным в определенных режимах наблюдения.

Алгоритм 1 (фазовый метод). Приемные элементы АР расположены на плоскости в точках с координатами: $M_1(d, d)$, $M_2(-d, d)$, $M_3(-d, -d)$, $M_4(d, -d)$. Для каждой четверки комплексных измерений \dot{s}_q , $q = \overline{1, 4}$, их фазы ψ_q зависят от x, y :

$$\begin{aligned}\psi_q &= \arg\{\dot{s}_q(f_j)\} = (2\pi/\lambda)\delta_q + \xi_q = \\ &= 2\pi/(R\lambda)(x_q x + y_q y) + \xi_q.\end{aligned}$$

При оценивании искоемых координат x, y выполняется следующее:

1. Измеряются аргументы комплексных величин \dot{s}_q — фазы $\psi_q = \arg\{\dot{s}_q\}$, $q = \overline{1, 4}$ с помощью фазового детектора.

2. Вычисляются разности фаз:

$$\Delta\psi_X = \psi_1 - \psi_3, \quad \Delta\psi_Y = \psi_2 - \psi_4.$$

3. Находятся оценки координат для i -х элементов дальности и j -х частот:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{ij} &= k\Delta\psi_X, \quad \hat{y}_{ij} = k\Delta\psi_Y, \\ \hat{z}_{ij} &= \sqrt{r_i^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \quad k_2 = R\lambda/(4\pi d).\end{aligned}$$

4. Операции п. 1–3 повторяются для всех значений $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$.

Замечание. Так как фазовые детекторы однозначно измеряют разность фаз на промежутке $[0, 2\pi]$, то для этого необходимо выполнение условия $2\pi\delta_q/\lambda \leq 2\pi$, т. е. $\delta_q \leq \lambda$, что достижимо при малых углах φ, θ (при ширине ДНА порядка 1° – 2°). Если $\delta_q > \lambda$, то возникает неоднозначность измерения фазы, для устранения которой рассматривается дополнительный алгоритм с использованием пятого центрального элемента антенны при несимметричном расположении остальных парных элементов.

Алгоритм отличается простотой реализации и применим для любого режима наблюдения. В частном режиме при $\mathbf{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$, когда координата x определяется доплеровской частотой, для оценки y можно задействовать только два измерительных канала (что отличает его от алгоритма 1).

Алгоритм рассчитан на один элементарный отражатель на каждой доплеровской частоте. При наличии нескольких элементарных отражателей на одной частоте оценке подлежит центр тяжести этой группы и точность оценивания снижается.

Алгоритм 2 (метод максимума амплитуды).

Алгоритм ориентирован на переднебоковой обзор, когда координата x определяется положением $\mathbf{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$ и частотой f_j , и требуется найти оценку одной координаты y . Алгоритм основан на получении распределения амплитуд вдоль оси oy с помощью метода, подобного методу сканирования лучом и фиксации углового положения луча с максимальной амплитудой отраженного сигнала. Отличие заключается в том, что вместо сканирования используются приемные элементы АР с разным направлением биссектрис ДНА. Применяется линейная АР, центры приемных элементов которой расположены на оси oy в Q точках с координатами $x_q = 0, y_q = \pm id, i = \overline{1, n_y}, Q = 2n_y + 1$. Биссектрисы ДНА q -х приемных элементов АР смещены по углу места θ на величину θ_{0q} таким образом, чтобы амплитудная ДН каждого q -го канала зависела от углового направления θ_{0q} :

$$D_q(\varphi, \theta) = \exp\{-k_0[\varphi^2/\Delta_\varphi^2 + (\theta - \theta_{0q})^2/\Delta_\theta^2]\}. \quad (5)$$

Практически это достигается за счет пространственной ориентации q -го элемента АР по углу места в направлении θ_{0q} . Возможно электронное управление лучом. Величины θ_{0q} задаются на промежутке $[-\Delta_\theta/2, \Delta_\theta/2]$ с шагом $h_\theta = \Delta_\theta/(Q - 1)$. Алгоритм оценивания координат следующий:

1. Для полученных измерений \dot{s}_q , $q = \overline{1, Q}$, вычисляются модули $|\dot{s}_q|$, которые дают распределение амплитуд $A_q = |\dot{s}_q|$, $q = \overline{1, Q}$ вдоль оси oy с шагом дискретизации $h_y = Rh_\theta$.

2. В последовательности $\{A_q\}$ выбирается максимальная по q амплитуда $A_{\max} = \max_q A_q$. Соответствующий A_{\max} номер q дает начальную оценку координаты y с точностью, определяемой величиной линейного шага h_y :

$$\hat{y}_0 = -R\Delta_\theta/2 + h_y(q - 1).$$

3. Оценка \hat{y}_0 уточняется методом интерполяции: находится смещение Δy в сторону точки максимума и для i -го элемента дальности и j -й частоты вычисляется уточненная оценка $\hat{y}_{ij} = \hat{y}_0 + \Delta y$. Оценки координат x, z вычисляются так же, как и в других алгоритмах для $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{ij} &= c_j/v_x, \quad \hat{z}_{ij} = \sqrt{R^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \\ &\text{где } c_j = R[(\lambda/2v)f_j - v_z].\end{aligned}$$

Замечание. Возможно применение алгоритма в режиме передненижнего обзора, когда вектор скорости лежит в вертикальной плоскости yoz . При этом частота f_j определяет координату y_j по формуле $y_j = c_j/v_y$, где $c_j = R[(\lambda/2v)f_j - v_z]$ и оценке подлежит одна координата x . Зависимость (5) меняется:

$$D_q(\varphi, \theta) = \exp\{-k_0[(\varphi - \varphi_{0q})^2/\Delta_\varphi^2 + \theta^2/\Delta_\theta^2]\}.$$

Данный режим отличается тем, что изодопы в пределах ДНА расположены горизонтально, то есть содержат несколько элементарных отражателей.

Алгоритм меняется следующим образом:

1. Получается распределение амплитуд $A_q = |\dot{s}_q|$, $q = \overline{1, Q}$ вдоль оси ox с шагом дискретизации $h_x = Rh_\varphi$, $h_\varphi = \Delta_\varphi/(Q - 1)$ на каждой частоте f_j .

2. Определяются номера q_1 и q_2 , соответствующие превышению амплитудой заданного порога, при движении по строке распределения амплитуд слева направо и справа налево. Тем самым определяются левая и правая границы положения отражающих элементов.

3. Оценки границ по координате x находятся аналогично предыдущему.

Алгоритм показал хорошие результаты по точности при наличии нескольких элементарных отражателей на каждой частоте для частных случаев переднебокового и передненижнего обзоров. К недостатку алгоритма 2 можно отнести его чувствительность к ошибкам измерения положения вектора скорости носителя РЛС и величины скорости, что не являлось принципиальным для алгоритма 1. Возможно комбинированное (адаптивное) применение алгоритмов 1 и 2 в зависимости от условий наблюдения.

Заключение

Использование нескольких пространственных каналов имеет очевидное преимущество по сравнению с одним каналом первичной обработки. Так, на дальности 1 км при ширине ДНА 2° максимальная погрешность оценок положения элементарного отражателя в системе с одним пространственным каналом составляет 0,7 (при наклоне изодоп 45°) от половины линейной ширины ДНА — 12 м. Предлагаемые алгоритмы позволяют измерить положение с погрешностью до 1 м (с учетом доверительно-го интервала ошибок, найденного по закону Рэлея). Следовательно, точность удастся повысить в 10 раз. Предлагаемые алгоритмы могут найти применение в бортовых радиолокационных системах наблюдения за земной поверхностью, в которых требуется знание высоты рельефа местности.

Список литературы

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Уч. пособ. для вузов / Под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
2. Клочко В. К. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплоопто-электронных системах. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
3. Клочко В. К., Нгуен Ч. Т. Сравнительный анализ алгоритмов формирования трехмерных изображений земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2014, № 4, вып. 50, с. 11–17.