

УДК 621.319

МОДЕЛЬ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ**ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА БАЗЕ БОРТОВОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РЛС****Клочко Владимир Константинович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой

Рязанского государственного радиотехнического университета.

E-mail: KlochkoVK@mail.ru.

Адрес: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Аннотация: Рассматривается модель многоканальной системы оценивания пространственных координат отражающих элементов, позволяющая расширить функциональные возможности бортовых доплеровских РЛС, предназначенных для обзора земной поверхности. На базе данной модели разрабатываются алгоритмы оценивания координат, основанные на моноимпульсном методе, фазовом методе и методе максимума амплитуды. Полученные оценки координат могут быть использованы для формирования трехмерного изображения рельефа местности.

Ключевые слова: бортовая доплеровская РЛС, многоканальная система, оценки координат, трехмерное изображение земной поверхности.

Введение

В существующих системах радиовидения [1 – 3] на базе бортовой импульсно-доплеровской РЛС, работающей в режиме узкополосной доплеровской фильтрации, формируется двумерное радиолокационное изображение (РЛИ) земной поверхности в координатах радиальная дальность – доплеровская частота в строках и столбцах матрицы амплитудного РЛИ. Каждый элемент матрицы РЛИ представляет собой модуль комплексного измерения, полученного на выходе тракта первичной обработки в элементах разрешения дальности на доплеровских частотах. Он образуется вследствие отражения электромагнитной волны в пространственном элементе разрешения. Пространственный элемент разрешения имеет протяженность вдоль линии доплеровской частоты (изодопы), на которой расположен элемент отражения земной поверхности. Так как по одному измерению невозможно определить пространственные координаты элемента поверхности, этот элемент относят к плоскости земли в координатах наклонная дальность – доплеровская частота. Такое РЛИ не дает информации о высоте рельефа местности.

Задача состоит в том, чтобы определить пространственные координаты элементов отражения на каждой изодопе в элементах дальности. Совокупность найденных координат, в дополнение к амплитудному РЛИ, после прохождения специального алгоритма отображе-

ния формирует трехмерное РЛИ участка земной поверхности [4, 5].

Цель данной работы – описание модели многоканальной системы узкополосной доплеровской фильтрации, позволяющей решить указанную задачу. Предлагаемая модель дает возможность получать не одно, а несколько комплексных измерений. Это достигается за счет включения нескольких пространственных каналов первичной обработки отраженных сигналов по числу 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.

Модель системы

Бортовая импульсная доплеровская РЛС, работающая в миллиметровом или сантиметровом диапазоне длин волн в режиме высокочастотного повторения импульсов, формирует узкий луч, круговая диаграмма направленности (ДН) которого на уровне 0,5 мощности составляет 1° - 2° по азимуту и углу места (для расширения зоны видимости осуществляется сканирование лучом). Принятые в q -х приемных элементах АР или q -й группой элементов АР ($q = \overline{1, Q}$, Q – число таких элементов) периодические сигналы $s_q(t)$ проходят тракт первичной обработки.

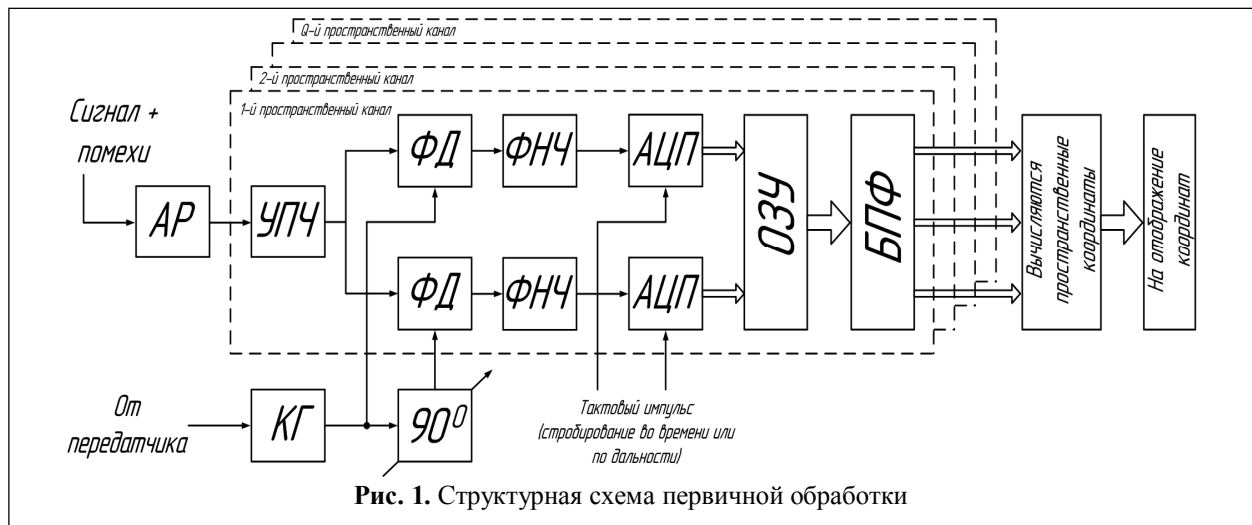


Рис. 1. Структурная схема первичной обработки

На рис. 1 показана структурная схема первичной обработки с Q пространственными каналами.

Каждый q -й канал ($q = \overline{1, Q}$) обрабатывает сигнал $s_q(t)$. Так как элементы АР разнесены в пространстве, сигналы в q -х каналах отличаются фазами. Обработка сигналов в каналах ведется независимо (параллельно). В q -х пространственных каналах сигналы $s_q(t)$ проходят усиление промежуточной частоты (УПЧ), фазовое детектирование (ФД), низкочастотную фильтрацию (ФНЧ), аналого-цифровое преобразование (АЦП) и стробирование по дальности (во времени t).

Запомненные в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) для каждого i -го элемента разрешения дальности R_i , $i = \overline{1, m}$ (m – число элементов дальности), комплексные временные последовательности $\dot{s}_{qi}(t_j)$, $j = \overline{1, N}$ (N – объем выборки), подаются на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). На выходе БПФ в каждом i -м элементе дальности ($i = \overline{1, m}$) получается комплексный спектр в выделенной полосе частот f_j в виде частотной

последовательности $\dot{s}_{qi}^*(f_j)$, $j = \overline{1, N}$.

Элементам разрешения по частоте этого спектра соответствуют пространственные элементы, в которых зафиксировано действие электромагнитного поля излучения (отсутствие или наличие отражения).

Спектральные последовательности $\dot{s}_{qi}^*(f_j)$, $j = \overline{1, N}$, поступают на алгоритм выделения спектральных отсчетов, структурная схема которого показана на рис. 2.

Данный алгоритм, сравнивая амплитуды $|\dot{s}_{qi}^*(f_j)|$ с порогом p , выделяет n частот f_j , $j = \overline{j_1, j_2}$ ($n < N$), на каждой из которых получены полезные сигналы отражения от элементов поверхности во всех Q каналах. Соответствующие этим j -м частотам комплексные спектральные отсчеты $\dot{s}_{qi}^*(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$, в i -х элементах дальности подаются на алгоритмы оценивания координат, которые в соответствии с тем или иным методом вычисляют оценки пространственных координат x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{j_1, j_2}$, в прямоугольной системе наблюдателя. Совокупность координат отображается в множество точек в пространстве, на



Рис. 2. Структурная схема выделения спектральных отсчетов

которых строится 3D-изображение поверхности (например, методом триангуляции) или карта высот.

Математическая постановка задачи

Спектральные отсчеты $\dot{s}_q(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$, (символы i , “*” опустим и примем обозначение: $j = \overline{1, n}$), подчинены модели [6, 7]:

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

Каждой j -й частоте f_j в (1) соответствуют k_j ($k_j = 1, 2, 3, \dots$) элементов отражения земной поверхности с координатами центров x_{jk}, y_{jk}, z_{jk} , сигналы от которых суммируются. В частном случае, определяющем характер гладкой поверхности, принимается $k_j = 1$, $\forall j = \overline{1, n}$, и модель (1) упрощается:

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

В моделях (1), (2) используются следующие обозначения: γ_q – мультипликативная помеха с единичным средним, описывающая амплитудную нестабильность; $U(\varphi, \theta)$ – амплитуда сигнала в координатах азимута φ и угла места θ ; $G(\varphi, \theta)$ – амплитудная ДН антенны (ДНА); i – мнимая единица; λ – длина волны; δ_q – линейное запаздывание или опережение отраженного сигнала при приеме его в q -м приемном элементе антенны по сравнению с центром антенны, зависящее от искомым координат x, y центра элемента отражения, дальности R и известных координат x_q, y_q центра q -го приемного элемента; 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 элемента отражения поверхности к дру-

тому, 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 с нулевым средним.

Величина $\delta_q(\varphi, \theta)$ для плоского фронта волны определена формулой расстояния от центра q -го приемного элемента антенны с координатами x_q, y_q до плоскости волны, достигшей центра антенны:

$$\delta_q(\varphi, \theta) = x_q \cos \theta \sin \varphi + y_q \sin \theta,$$

или, с учетом $\cos \theta \sin \varphi = x/R$, $\sin \theta = y/R$, где x, y – прямоугольные координаты точки отражения в антенной системе координат, R – наклонная дальность, имеем:

$$\delta_q(x, y) = (x_q x + y_q y)/R.$$

Модель изодопы. Пространственный элемент разрешения доплеровской РЛС в пределах объема ДНА расположен вдоль изодопы – линии пересечения сферической поверхности уровня дальности R и конической поверхности уровня частоты f_j . На изодопе находится и отражающий элемент поверхности. Известна зависимость [1]:

$$f_j = (2v/\lambda) \cos \alpha_j,$$

связывающая доплеровскую частоту f_j с косинусом угла α_j между ортом $\vec{v}^0 = (v_x, v_y, v_z)$ вектора \vec{v} скорости движения носителя РЛС (v_x, v_y, v_z – направляющие косинусы вектора \vec{v}) и радиус-вектором $\vec{r} = (x, y, z)$ центра отражающего элемента поверхности. Нетрудно установить через скалярное произведение векторов \vec{v}^0 и \vec{r} :

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

Уравнение плоскости (3) совместно с уравнением сферы $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ при фиксированной дальности R дает уравнение изодопы. Для узкой ($1^0 - 2^0$) ДНА в (3) принимается $z \approx R$ и (3) упрощается:

$$v_x x + v_y y = c_j,$$

$$c_j = R(\cos \alpha_j - v_z) = R[(\lambda/2v) f_j - v_z], \quad (4)$$

т.е. изодопы в пределах ширины ДНА аппроксимируется прямой.

Из (4) вытекают практически важные случаи переднебокового обзора, когда

$\vec{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$ и координата x определяется доплеровской частотой: $x = c_j / v_x$, а также передненижнего обзора, когда $\vec{v}^0 = (0, v_y, v_z)$ и $x = c_j / v_y$.

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 $\hat{s}_{qi}(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$. Модели измерений (1), (2) используются далее при синтезировании трех алгоритмов оценивания координат [8].

Оценки координат находятся с помощью нескольких алгоритмов, основанных на моноимпульсном методе (алгоритм 1), фазовом методе (алгоритм 2) и методе максимума амплитуды (алгоритм 3) [9]. Алгоритмы 1 и 2 рассчитаны на 4 пространственных канала плоской АР и инвариантны к положению изодопы. Алгоритм 1 устойчиво работает только на линейной части пеленгационной характеристики. Алгоритм 2 в большей степени чувствителен к скачкам фазы, но дает более точные оценки. В частных случаях переднебокового и передненижнего обзоров алгоритм 2 может быть реализован с применением только двух приемных элементов (двух каналов) – вертикальных или горизонтальных. Алгоритмы 1 и 2 рассчитаны на один элементарный отражатель на каждой доплеровской частоте. При наличии нескольких элементарных отражателей на одной частоте оценке подлежит некоторый центр этой группы и точность оценивания каждого отражателя снижается. Этот недостаток преодолевается в алгоритме 3, в котором применяется уравнение изодопы (4). Алгоритм 3 используется для линейной АР с 7 приемными элементами, чувствителен к нестабильности траектории полета, но позволяет находить границы протяженных объектов.

Алгоритмы апробированы методом компьютерного моделирования на модели участка земной поверхности [10]. Результаты моделирования показали, что алгоритмы 2 и 3 отличаются повышенной точностью в определенных режимах наблюдения. Рекомендуется их комбинированное применение. Сложность

разработанных алгоритмов линейно возрастает с увеличением числа частот при параллельной обработке сигналов в элементах дальности и имеет квадратичную зависимость при последовательной обработке в элементах дальности. Все алгоритмы реализуются в реальном времени.

Выводы

Использование нескольких пространственных каналов имеет очевидное преимущество по сравнению с одним каналом первичной обработки. Так, на дальности 1 км при ширине ДНА 2^0 максимальная погрешность оценки положения элементарного отражателя в системе с одним пространственным каналом составляет половину линейной ширины ДНА – 12 м. Предлагаемые алгоритмы позволяют измерить положение с погрешностью до 1 м (с учетом доверительного интервала ошибок оценивания). Следовательно, точность удастся повысить в 10 раз.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Радиовидение наземных объектов в сложных метеоусловиях / Ощепков П.К., Павельев В.А., Вайнберг Э.И. и др.; под ред. В.А. Павельева. М.: Радиотехника, 2007. 80 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин, Толстов Е.Ф. и др. Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
4. Ключко В.К. Методы формирования трехмерных изображений поверхности в бортовых системах радиовидения // Автотметрия. 2009. № 1. С. 23 – 33.
5. Трехмерное радиовидение на базе бортовой доплеровской РЛС // Радиотехника. 2015. № 5. С. 35 – 40.
6. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Ключко. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
7. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Математическая модель системы формирования трехмерных радиоизображений на основе доплеровской фильтрации и оценивания координат // Вестник РГРТУ. 2013. № 2 (выпуск 44). С. 11 – 18.
8. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Алгоритмы формирования трехмерного изображения земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 44 – 49.

9. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.

10. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Сравнительный анализ алгоритмов формирования трехмерных изображений земной поверхности в бортовой до-

плеровской РЛС // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 4 (выпуск 50). С. 11 – 17.

Поступила 18 июня 2015 г.

English

Multichannel system model of element coordinates evaluation of earth surface on the basis of onboard Doppler RS

Vladimir Konstantinovich Klochko – Doctor of Technical Science Associate Professor Department Head “Ryazan State Radio Engineering University”.

E-mail: KlochkoVK@mail.ru.

Address: 390005, Ryazan, Gagarin St., 59/1.

Abstract: The existing radio vision systems based on onboard pulse Doppler RS and operating in the mode of narrow-band Doppler filtering form two-dimensional radar image (RI) of earth surface in coordinates radial range – Doppler frequency in i - x lines and j - x columns of amplitude RI matrix. Each i, j - RI matrix element represents complex measurement module obtained at the path output of pre-processing in i - m an element of resolution range on j - Doppler frequency. It is formed due to reflection of electromagnetic wave in i, j - space resolution element. Space resolution element extends along the line of the Doppler frequency (isolines) on which reflection element of earth surface is located. As it is impossible to define earth element coordinates by one measurement then this element is referred to earth plane in coordinates slant range – Doppler frequency. Such RI has no information on relief height. The problem consists in defining spatial coordinates of reflection elements in each j -isoline in i - x range elements. Set of the defined coordinates creates three-dimensional RI of earth area in addition to amplitude RI after passing special display algorithm. This paper is aimed at description of model of multichannel system of the narrow-band Doppler filtering enabling to solve the specified problem. The suggested model enables to get not one but several complex measurements. This is obtained via switching on of several space channels of reflected signals pre-processing according to number of receiving elements of antenna array (AA) which are spaced in the plane of one antenna in centimeters. Phase delay or advance of signals received by AA receiving elements provides information about spatial position of earth surface reflecting elements. The measurement error of reflection elements position of surface relief in system with several space channels is at least 10 times less than a measurement error of position in system with one space channel.

Key words: onboard Doppler RL, multichannel system of coordinates evaluation, three-dimensional image of earth surface.

References

1. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of Earth remote probing: ycheb. posobiye dlya vuzov. - Ed. by S. Kondratenkov. – M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.
2. Radio vision of land objects in heavy weather. - Oshchepkov P. K., Pavelyev V.A., Weinberg E.I. and other colleagues; ed. by V.A. Pavelyev. M.: Radiotekhnika, 2007. 80 p.
3. Radar stations with digital synthesizing of antenna aperture. - V.N. Antipov, V.T. Goryainov, A.N. Kulin, Tolstov E.F. and other colleagues. Ed. by V.T. Goryainov. M.: Radio i svyaz, 1988. 304 p.
4. Klochko V. K. Methods of forming three-dimensional images of a surface in onboard radio vision systems of. - Avtometriya. 2009. No. 1. P.23 - 33.
5. Three-dimensional radio vision on the basis of onboard Doppler RS. - Radiotekhnika. 2015. No. 5. Page 35 - 40.
6. Mathematical methods of recovery and processing of images in radio-thermal optoelectronic systems. - V.K. Klochko. Ryazan: RGRTU, 2009. 228 p.
7. Klochko V.K., Nguyen Ch.T. System mathematical model of forming three-dimensional radio images on the basis of Doppler filtering and coordinates evaluation. - Vestnik RGRTU. 2013. No. 2 (vypusk 44). P. 11 - 18.
8. Klochko V.K., Nguyen Ch.T. Algorithms of forming three-dimensional image of earth surface in onboard Doppler RS. - Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. 2014. No. 10. P. 44 - 49.
9. Finkelstein M.I. Radar-location basics: textbook for higher education institutions. M.: Radio i svyaz, 1983. 536 p.
10. Klochko V.K., Nguyen Ch.T. Comparative analysis algorithms forming three-dimensional images of earth surface in onboard Doppler RS. - Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014. № 4 (vypusk 50). P. 11 - 17.