

## Модель многоканальной системы оценивания координат элементов земной поверхности на базе бортовой доплеровской РЛС

В.К. Клочко

Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, Email: [KlochkoVK@mail.ru](mailto:KlochkoVK@mail.ru)

*Рассматривается модель многоканальной системы оценивания пространственных координат отражающих элементов, позволяющая расширить функциональные возможности бортовых доплеровских РЛС, предназначенных для обзора земной поверхности.*

*The model of multi-channel system of estimation of spatial coordinates of the reflecting elements allowing to expand functionality of the onboard Doppler RLS intended for the review of a terrestrial surface is considered.*

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  $1^0 - 2^0$  по азимуту и углу места. Принятый в одном пространственном канале периодический сигнал  $s(t)$  проходит тракт первичной обработки, включающий усиление промежуточной частоты (УПЧ), фазовое детектирование (ФД), низкочастотную фильтрацию (ФНЧ), аналого-цифровое преобразование (АЦП) и стробирование по дальности (во времени  $t$ ). Запомненная в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) для каждого  $i$ -го элемента (пояса) дальности  $R_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  ( $m$  – число элементов дальности), комплексная временная последовательность  $\dot{s}_i(t_j)$ ,  $j = \overline{1, N}$  ( $N$  – объем выборки), подается на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). Порядок преобразований показан на рисунке 1 для одного пространственного канала. На выходе БПФ в каждом  $i$ -м элементе дальности ( $i = \overline{1, m}$ ) получается комплексный спектр в выделенной полосе частот в виде частотной последовательности  $\dot{s}_i^*(f_j)$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Каждому элементу разрешения по частоте этого спектра соответствует пространственный элемент, в котором зафиксировано действие электромагнитного поля излучения (отсутствие или наличие отражения).

При определенном положении вектора скорости носителя РЛС  $\vec{v}$  пространственный элемент разрешения составляет  $n$ -ю часть ДН ( $n = 10 - 30$ ) по числу  $n$  элементов разрешения частоты, что приводит к хорошему разрешению по азимуту. Однако величина погрешности измерения угла места, определяемая наклоном пространственных элементов разрешения, максимально равняется половине ширины ДН. В связи с этим возникает необходимость уточнения пространственных координат элементов отражения в пределах узких, но пространственно-протяженных элементов разрешения (изодоп частоты  $f_j$ ).

Оценки пространственных координат элементарных отражателей, расположенных на изодопах, можно получить за счет увеличения числа пространственных каналов первичной обработки. На рисунке 1 показано предлагаемое дополнение структурной схемы первичной обработки системы наблюдения  $Q$  каналами первичной обработки. Каждый  $q$ -й пространственный канал ( $q = \overline{1, Q}$ ) обрабатывает сигнал  $s_q(t)$ , принятый  $q$ -м приемным элементом антенной решетки – АР (или  $q$ -й группой элементов АР). Так как элементы АР разнесены в пространстве, то сигналы в  $q$ -х каналах отличаются фазами. Обработка сигналов  $s_q(t)$  в каждом  $q$ -м канале ведется независимо (параллельно).

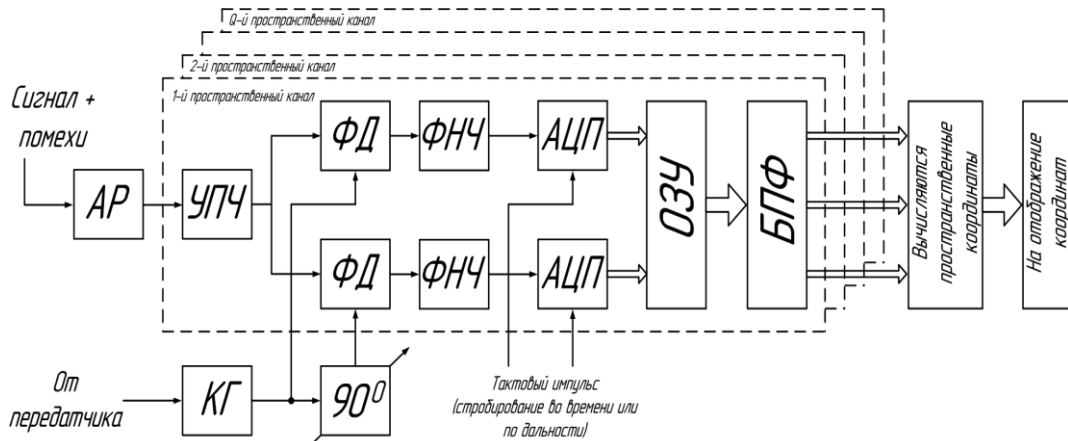


Рис. 1. Структурная схема первичной обработки

Полученные на выходе  $q$ -х каналов частотные последовательности  $\dot{s}_{qi}^*(f_j)$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , запомненные в  $i$ -х элементах дальности ( $i = \overline{1, m}$ ), подаются на алгоритм выделения спектральных отсчетов, структурная схема которого показана на рисунке 2.

Данный алгоритм выделяет  $n$  частот  $f_j$ ,  $j = \overline{j_1, j_n}$  ( $n < N$ ), на которых получены полезные сигналы отражения от элементов поверхности, сравнивая амплитуды с порогом  $p$ . Соответствующие этим частотам комплексные спектральные отсчеты  $\dot{s}_{qi}^*(f_j)$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , в  $i$ -х элементах дальности подаются на вход алгоритмов оценивания координат, которые в соответствии с тем или иным методом находят оценки искомых координат  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{j_1, j_n}$ , в прямоугольной системе наблюдателя.

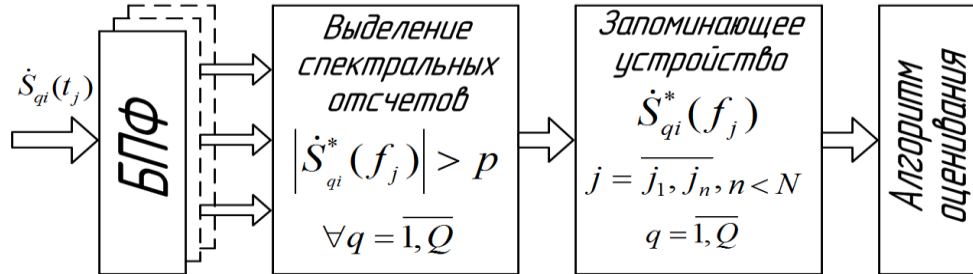


Рис. 2. Структурная схема выделения спектральных отсчетов

Спектральные отсчеты  $\dot{s}_q(f_j)$ ,  $q = \overline{1, Q}$  (символы  $i$  и  $*$  опустим), описываются моделью [1]:

$$\dot{s}_q(f_j) = \gamma_q \sum_{k=1}^{m_j} U(\varphi_{j_k}, \theta_{j_k}) G(\varphi_{j_k}, \theta_{j_k}) \exp\{i[(2\pi/\lambda)\delta_q + \xi_q]\} + \dot{p}_q(f_j), \quad (1)$$

$$\delta_q(x, y) = (x_q x_{j_k} + y_q y_{j_k}) / R, \quad \xi_q = -(4\pi/\lambda)R + \varepsilon(\varphi, \theta) + \eta_q(f_j), \quad \xi_q = \xi_q(f_j), \quad \gamma_q = \gamma_q(f_j).$$

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 модели (1) используются следующие обозначения:  $\gamma_q$  – мультипликативная помеха;  $U(\varphi, \theta)$  – амплитуда сигнала в координатах азимута  $\varphi$  и угла места  $\theta$ ;  $G(\varphi, \theta)$  – амплитудная ДНА;  $i$  – мнимая единица;  $\lambda$  – длина волны;  $\delta_q$  – запаздывание или опережение отраженного сигнала в метрах 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;  $\xi_q$  – составляющая фазы, зависящая от  $R$  и случайных величин  $\varepsilon(\varphi, \theta)$  и  $\eta_q(f_j)$ , где  $\varepsilon$  меняет свои значения по равномерному закону на  $[0, 2\pi]$  при переходе от одного  $\varphi$ -го,  $\theta$ -го элемента отражения поверхности к другому, а  $\eta_q$  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, представленной пересечением сферической поверхности  $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$  плоскостью:

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

где  $v$  – величина скорости носителя РЛС;

$v_x, v_y, v_z$  – координаты орта  $\vec{v}^0$  вектора скорости  $\vec{v}$ .

Для узкой ДНА в (2) принимается  $z \approx R$  и (2) упрощается:

$$v_x x + v_y y = c_j, \quad c_j = R[(\lambda / 2v) f_j - v_z]. \quad (3)$$

*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  $\hat{s}_{qi}(f_j)$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , и моделей (1 - 3).

Оценки координат находятся с помощью нескольких алгоритмов, основанных на моноимпульсном методе (алгоритм 1), фазовом методе (алгоритм 2), методе восстановления (алгоритм 3) и методе максимума амплитуды (алгоритм 4). Алгоритмы апробированы методом компьютерным моделированием на модели поверхности [2].

Результаты моделирования показали, что алгоритмы 2 и 4 отличаются от остальных 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.

Использование нескольких пространственных каналов имеет очевидное преимущество по сравнению с одним каналом первичной обработки. Так, на дальности 1 км при ширине ДН  $2^0$  максимальная погрешность оценки положения элементарного отражателя в системе с одним пространственным каналом составляет 0,7 (при наклоне изодоп  $45^0$ ) от половины линейной ширины ДН – 12 м. Предлагаемые алгоритмы позволяют измерить положение с погрешностью до 1 м (с учетом доверительного интервала ошибок оценивания, найденного по закону Рэлея). Следовательно, точность удастся повысить в 10 раз.

## Литература

1. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Ключко. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
2. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Сравнительный анализ алгоритмов формирования трехмерных изображений земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 4 (выпуск 50). С. 11 – 17.