

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Клочко В.К., д.т.н., профессор РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: klochkovk@mail.ru

Ву Ба Хунг, аспирант РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: ronando2441996@gmail.com

TIME-FREQUENCY PROCESSING OF RADIO SIGNALS FROM MULTIPLE MOVING OBJECTS

Klochko V.K., Vu Ba Hung

The problem of determining the angular coordinates of several objects in multi-channel Doppler radar is being solved. Three approaches to processing reflection signals from several moving objects are considered in comparison – processing in the time domain, in the frequency domain and joint time-frequency signal processing. For processing in the time domain, a new approach is proposed to select signals from each object from a mixture of signals based on extrapolation of initially isolated signals, their subtraction from the smoothed mixture of signals and phase estimation using the Kalman filter. For processing in the frequency domain, the known approach for selection of spectral components in a signal mixture in several processing channels with the following determination of angular coordinates by the phase method is considered. To be able to detect objects moving with similar velocity vectors and time points of arrival of reflected signals, the time-frequency processing is proposed based on comparing the number of objects detected in time and frequency domains and angular coordinates found in these regions. The results of computer modeling of algorithms that realize approaches are presented. The advantage of time-frequency approach is shown. It is recommended to use the proposed approach in existing finding systems for detecting several moving objects.

Key words: radio signal processing, time processing, frequency processing, time-frequency processing, object detection, parameter estimates.

Ключевые слова: обработка радиосигналов, временная обработка, частотная обработка, частотно-временная обработка, обнаружение объектов, оценки параметров.

Введение

При пеленгации нескольких маловысотных объектов на малой дальности посредством доплеровской радиолокационной станции (РЛС) на заданном рубеже дальности возникает проблема обнаружения объектов, имеющих близкие векторы скорости и моменты времени прихода отраженных сигналов. Если несколько объектов имеют близкие доплеровские частоты, то они обнаруживаются в спектре доплеровских частот как один объект. Однако, если сигналы отражения от объектов приходят в разные моменты времени, то объекты обнаруживаются по времени прихода сигналов. С другой стороны, возникают ситуации, когда сигналы отражения от объектов приходят в близкие моменты времени, но в силу различия векторов скорости объекты обнаруживаются по доплеровской частоте. Не исключается случай, когда объекты не обнаруживаются и по времени и по доплеровской частоте, но он маловероятен.

Возникает необходимость совместной обработки принимаемых сигналов во временной и частотной областях в целях обнаружения объектов с близкими доплеровскими частотами или близкими моментами времени прихода сигналов. Известны работы, основанные на совместной частотно-временной обработке сигналов [1 – 3].

Решается задача обнаружения и оценивания угловых координат нескольких объектов в многоканальной доплеровской РЛС. Рассматриваются в сравнении три подхода к обработке сигналов отражения – обработка во временной области, в частотной области и совместная частотно-временная обработка. Для обработки во временной области предлагается подход к выделению сигналов от каждого объекта из смеси сигналов, основанный на экстраполяции первоначально выделенных сигналов, их вычитании из сглаженной смеси сигналов и оценивании фазы с помощью фильтра Калмана. Для обработки в частотной области рассматривается известный подход выделения спектральных составляющих смеси сигнала в нескольких каналах обработки с последующим определением угловых координат методом разности фаз. Для возможности обнаружения объектов, имеющих близкие векторы скорости и моменты времени прихода отраженных сигналов, предлагается частотно-временная обработка, основанная на сравнении числа объектов, обнаруженных во временной и частотной областях, а также найденных в этих областях угловых координат. Представлены результаты компьютерного моделирования работы алгоритмов, реализующих подходы. Показано преимущество частотно-временного подхода. Рекомендуется применение предложенного подхода в существующих системах пеленгации нескольких движущихся объектов.

Однако предлагаемые там решения требуют больших вычислительных затрат. Также известна работа [4], но предлагаемое в ней решение ограничено случаем не более двух объектов и предположением о равенстве амплитуд и частот сигналов от них. В данной работе предлагается решение, свободное от указанных ограничений, которое не меняет существующей схемы доплеровской обработки отраженных сигналов в частотной

области и лишь добавляет к ней параллельную процедуру обработки сигналов во временной области и анализ полученных в двух областях оценок.

Целью работы является разработка алгоритма обнаружения и оценивания угловых координат нескольких движущихся объектов в доплеровской РЛС, позволяющего различать объекты с близкими векторами скорости и моментами времени прихода сигналов за счет частотно-временной обработки принимаемых сигналов.

Модель сигнала и постановка задачи

Приемопередающая станция посылает гармонический сигнал $s(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ с амплитудой U_0 , несущей частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 в заданном угловом направлении и принимает отраженные сигналы в периоде зондирования, соответствующем заданному рубежу дальности. Такой режим обеспечивает малые энергетические затраты и дает возможность использования малогабаритных мобильных станций.

Положение каждого объекта $M(\theta, \varphi, R)$ в антенной системе координат измеряется углом места θ , азимутом φ и дальностью R , при этом угол θ отсчитывается в вертикальной плоскости, угол φ – в горизонтальной так, как показано на рис. 1. Движение объекта рассматривается в прямоугольной системе координат. Оценки пространственных координат находятся как в сферической, так и прямоугольной системах. Прямоугольные и сферические координаты связаны $x = R \cos \theta \sin \varphi$, $y = R \sin \theta$, $z = R \cos \theta \cos \varphi$. Отраженные сигналы принимаются антенной решеткой (АР). Приемные элементы АР расположены в плоскости ОХУ с прямоугольными координатами центров $(x_1, y_1) = (0, 0)$, $(x_2, y_2) = (d_m, 0)$, $(x_3, y_3) = (0, d_m)$, $(x_4, y_4) = (-d_z, 0)$, $(x_5, y_5) = (0, -d_z)$, $d_m > 0$, $d_z > 0$, несимметрично (для учета неоднозначности измерения фазы), как показано на рис. 2 (d_m – точная база, d_z – грубая база).

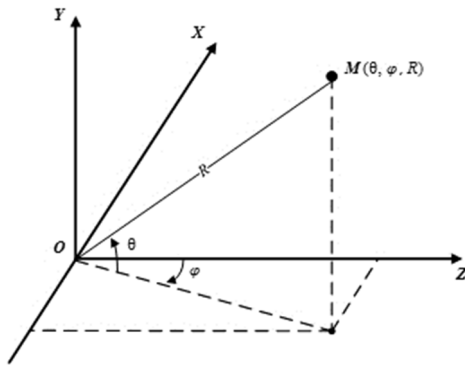


Рис. 1. Антенная система координат

Сигнал отражения от отдельного объекта, принятый на дальности R в q -м приемном элементе АР ($q = 1, 2, \dots, Q$, $Q = 5$ – число элементов АР) в момент времени t описывается моделью

$$s_q(t - \tau_q) = \tilde{U}_0 G(\varphi, \theta) \times \cos[(\omega_0(t - \tau_q) + \varphi_0 + \eta + \varepsilon_q)] + p_q,$$

где \tilde{U}_0 – амплитуда отраженного сигнала, зависящая от U_0 , R и отражающих свойств объекта; $G(\varphi, \theta)$ – амплитудная характеристика диаграммы направленности (ДН) приемного элемента АР (одинаковая для всех q -х элементов); $\omega_0 = 2\pi c / \lambda$, c – скорость света, λ – длина волны; τ_q – задержка сигнала: $\tau_q = D_q / c$, $D_q = 2R + \delta_q$ – расстояние, пройденное сигналом в случае неподвижного объекта; δ_q – отклонение фронта волны, достигшей q -го бокового элемента АР, относительно центра антенны ($\delta_0 = 0$); η – случайное изменение фазы на $[-\pi, \pi]$ при отражении от объекта; ε_q – фазовый шум в q -м канале; p_q – аддитивный белый гауссовский шум в q -м канале.

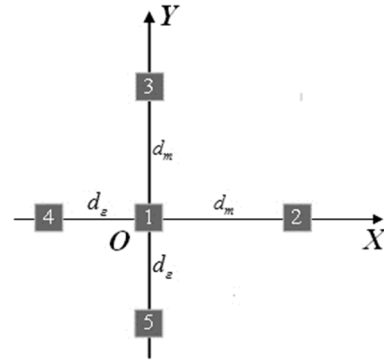
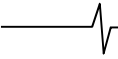


Рис. 2. Расположение элементов АР

Суммарный сигнал отражения от нескольких движущихся объектов принимается антенной решеткой (АР) и проходит тракт первичной обработки в нескольких q -х приемных каналах ($q = 1, \dots, Q$, Q – число каналов по числу приемных элементов АР). После понижения частоты и дискретизации по времени t_i модель дискретной последовательности $\{y_q(t_i)\}$ значений принимаемого сигнала в q -м приемном канале имеет вид [4]

$$\begin{aligned} y_q(t_i) &= \sum_{k=1}^m s_{qk}(t_i - \tau_{qk}) + p_q(t_i) = \\ &= \sum_{k=1}^m \tilde{U}_{0k} G(\varphi_k, \theta_k) \cos(\omega_{0k} t_i - 4\pi R_k / \lambda - \\ &\quad - 2\pi \delta_{qk}(\varphi_k, \theta_k) / \lambda + \xi_k + \varepsilon_q) + p_q(t_i) = \\ &= \sum_{k=1}^m A_k \cos(\omega_{0k} t_i - \psi_{qk}) + p_q(t_i), \\ i &= \overline{1, n}, \quad q = \overline{1, Q}, \end{aligned}$$

где n – число дискретных отсчетов моментов времени на промежутке времени длительностью $T = t_n - t_1$; τ_{qk} – момент времени появления k -го сигнала в q -м приемном канале; ω_{0k} – промежуточная частота с учетом доплеровского сдвига от k -го объекта; t_i – текущее дискретное время; m – неизвестное число сигналов, отраженных от m объектов; \tilde{U}_{0k} – амплитуда отраженного сигнала от k -го объекта; R_k – радиальная дальность до k -го объекта; $\xi_k = \varphi_0 + \eta_k$ – случайная величина; φ_k и θ_k – соответственно азимут и угол места k -го объекта в антенной



системе координат; A_k и ψ_{qk} – амплитуда и фаза принимаемого сигнала от k -го объекта в q -м канале.

После прохождения тракта первичной обработки отраженных сигналов последовательности $y_q(t_i)$, $i = \overline{1, n}$, $q = \overline{1, Q}$, подвергаются быстрому преобразованию Фурье, в результате чего образуются частотные последовательности $\dot{S}_q(\omega_o(i))$, $i = \overline{1, n_1}$, $n_1 > n$, $q = \overline{1, Q}$.

Информация об угловых координатах k -го объекта φ_k , θ_k во временной области находится в фазах ψ_{qk} в выражениях δ_{qk} , которые для плоского фронта волны имеют вид [5]:

$$\delta_{qk} = x_q \cos \theta_k \sin \varphi_k + y_q \sin \theta_k,$$

где x_q и y_q – координаты центра q -го приемного элемента АР в антенной прямоугольной системе координат, а угловые координаты φ_k , θ_k определяются методом разности q -х фаз [5].

В частотной области эта же информация находится в аргументах комплексных составляющих спектра доплеровских частот: $\psi_{qk} = \arg \dot{S}_q[\omega_o(i_k)]$, где $\omega_o(i_k)$ – доплеровские частоты, соответствующие k -м объектам: i_k принимает m значений на $\{1, 2, \dots, n_1\}$.

Задача. Так как число объектов m заранее неизвестно, то задача заключается в обнаружении и выделении сигналов $s_{qk}(t_i - \tau_{qk})$ от k -х объектов в q -х приемных каналах во временной области и обнаружении спектральных составляющих $\dot{S}_q[\omega_o(i_k)]$ k -х объектов в q -х приемных каналах в полосе доплеровских частот. После выделения составляющих сигнала задача заключается в нахождении оценки \hat{m} числа объектов и оценок угловых координат φ_k , θ_k всех k -х объектов ($k = \overline{1, \hat{m}}$) методом разности фаз совместно во временной и частотной области.

Обработка во временной области

Если сигналы от объектов приходят в разные моменты времени τ_k , то для определения τ_k на фоне аддитивного шума можно воспользоваться оптимальным по методу максимального правдоподобия обнаружителем [6]. При этом, что не является принципиальным, можно применить и другие критерии: критерий согласия Пирсона для одной гипотезы H_0 – присутствия дискретного белого шума $p_q(t_i) \sim N(0, \sigma_p^2)$ или логический критерий « L из N » (например, «2 из 3-х» подряд) попаданий в доверительный интервал, рассчитанный с учетом σ_p [4]. Главным отличием предлагаемого алгоритма является способ выделения из смеси сигналов отдельных составляющих, принадлежащих объектам, во временной области.

Алгоритм обработки сигналов во временной области сводится к следующим операциям.

1. На начальном промежутке времени $[t_1, \tau_1)$, пред-

шествующем моменту времени τ_1 появления сигнала от первого объекта, в q -х каналах действует дискретный белый шум: $y_q(t_i) = p_q(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, $i = 1, 2, \dots$, с нулевым средним и дисперсией σ_p^2 . Последовательности $\{y_q(t_i)\}$, $q = \overline{1, Q}$, подаются на вход одноступенчатого экспоненциального фильтра нулевого порядка, который оценивает среднее нулевое значение шумового сигнала, и в соответствии с операциями, изложенными в [4], обнаруживаются моменты времени τ_{q1} появления сигналов $s_{q1}(t_i - \tau_{q1})$, $q = \overline{1, Q}$, $t_i \geq \tau_{q1}$, от первого объекта в q -х каналах.

2. После принятия решения о наличии сигналов $s_{q1}(t_i - \tau_{q1})$, $q = \overline{1, Q}$, от первого объекта, начиная с моментов τ_{q1} , включается в работу трехступенчатый экспоненциальный фильтр, наиболее простой в реализации и сглаживающий последовательность $y_q(t_i)$ по модели 2-го порядка в пределах эффективной памяти фильтра в каждом q -м канале с целью подавления шумов $p_q(t_i)$.

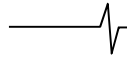
Получаются сглаженные последовательности $\tilde{y}_{q1}(t_i) = s_{q1}(t_i - \tau_{q1}) + \tilde{p}_{q1}(t_i)$, $t_i \geq \tau_{q1}$, где $\tilde{p}_{q1}(t_i)$ – ошибка сглаживания. По сглаженным значениям $\tilde{y}_{q1}(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, вычисляются оценки полупериодов сигналов в Q каналах и по совокупности этих оценок определяется оценка частоты $\hat{\omega}_1$. Одновременно находятся остаточные ряды $e_{q1}(t_i) = y_q(t_i) - \tilde{y}_{q1}(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, которые обрабатываются одноступенчатым экспоненциальным фильтром для обнаружения моментов времени τ_{q2} появления второго сигнала.

3. Сглаженные последовательности $\tilde{y}_{q1}(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, $\tau_1 < t_i < \tau_2$, запоминаются и повторно обрабатываются алгоритмом оценивания фазы сигнала. Известен оптимальный по методу максимального правдоподобия измеритель фазы сигнала на фоне аддитивного шума [6]. Такой измеритель фазы, работающий в непрерывном времени t , требует наличия линии задержки по фазе и вычисления корреляционного интеграла от опорного и принимаемого сигнала для каждой задержки по фазе [6]. В работе для оценивания фазы выбран дискретный фильтр Калмана [5], позволяющий наряду с оцениванием фазы дополнительно сглаживать сигнал, что положительно отличает его от эвристических алгоритмов измерения фазы. В разделе моделирования будет проведено сравнение работы предлагаемого алгоритма с применением оптимального измерителя фазы [6] и фильтра Калмана. Калмановский фильтр настроен на модель сигнала [5] вида

$$s_{q1}(t_i - \tau_{q1}) = a_{q1} \cos \hat{\omega}_1 t_i + b_{q1} \sin \hat{\omega}_1 t_i,$$

где $\hat{\omega}_1$ – найденная оценка частоты; a_{q1} и b_{q1} – параметры, постоянные в пределах эффективной памяти фильтра. Модель измерения имеет вид

$$\tilde{y}_{q1}(t_i) = H_i X_i + \tilde{p}_{q1}(t_i),$$



где $H_i = (\cos \hat{\omega}_1 t_i \ \sin \hat{\omega}_1 t_i)$, $X_i = (a_{q1}, b_{q1})^T$ – вектор состояния, подчиненный уравнению

$$X_{i+1} = AX_i, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Фильтр Калмана [5] последовательно во времени t_i находит оценку вектора состояния $\hat{X}_i = (\hat{a}_{q1}(t_i), \hat{b}_{q1}(t_i))^T$, и на основе оценок параметров $\hat{a}_{q1}(t_i), \hat{b}_{q1}(t_i)$ вычисляются оценки фаз в q -х каналах к моментам времени τ_{q2} прихода второго сигнала

$$\hat{\psi}_{q1} = \arctg(\hat{b}_{q1}(\tau_{q2}) / \hat{a}_{q1}(\tau_{q2})), \quad q = \overline{1, Q},$$

или с учетом π в зависимости от знаков $\hat{a}_{q1}(\tau_2)$ и $\hat{b}_{q1}(\tau_2)$.

Обработка фаз $\hat{\psi}_{q1}$, $q = \overline{1, Q}$, происходит по методу разности фаз и результатом обработки являются оценки угловых координат $\hat{\phi}_1, \hat{\theta}_1$ первого объекта.

4. По остаточным рядам $e_{q1}(t_i)$, $t_i > \tau_1$, обнаруживаются моменты времени τ_{q2} и принимается решение о наличии сигналов $s_{q2}(t_i - \tau_{q2})$, $q = \overline{1, Q}$, от второго объекта. Начиная с моментов времени τ_{q2} , формируются и запоминаются последовательности значений экстраполированных оценок сигналов от первого объекта

$$\hat{s}_{q1}(t_i - \tau_{q1}) = \hat{a}_{q1}(\tau_{q2}) \cos \hat{\omega}_1 t_i + \hat{b}_{q1}(\tau_{q2}) \sin \hat{\omega}_1 t_i,$$

$$q = \overline{1, Q}, \quad t_i > \tau_2.$$

5. По истечении времени Δt переходного процесса (величина Δt устанавливается эмпирически), начиная с момента $\tau_2 + \Delta t$, производится вычитание из сглаженных входных последовательностей $\tilde{y}_q(t_i)$ экстраполированных оценок сигнала от первого объекта, и разность принимается за оценку сигнала $s_{q2}(t_i - \tau_{q2})$ от второго объекта:

$$\hat{s}_{q2}(t_i - \tau_{q2}) = \tilde{y}_q(t_i) - \hat{s}_{q1}(t_i - \tau_{q1}), \quad q = \overline{1, Q}, \quad t_i \geq \tau_{q2} + \Delta t.$$

6. Подсчитывается число полупериодов сигналов $\hat{s}_{q2}(t_i - \tau_{q2})$, $q = \overline{1, Q}$, и находится оценка частоты $\hat{\omega}_2$. Запомненные последовательности $\hat{s}_{q2}(t_i - \tau_{q2})$ повторно обрабатываются фильтром Калмана на основе модели сигнала

$$\hat{s}_{q2}(t_i - \tau_{q2}) = a_{q2} \cos \hat{\omega}_2 t_i + b_{q2} \sin \hat{\omega}_2 t_i,$$

и методом разности фаз находятся оценки угловых координат $\hat{\phi}_2, \hat{\theta}_2$ второго объекта.

7. Продолжается сглаживание входных последовательностей $y_q(t_i)$ при $t_i \geq \tau_{q2}$ трехступенчатым фильтром, в результате получаются сглаженные последовательности

$$\tilde{y}_{q2}(t_i) = s_{q1}(t_i - \tau_{q1}) + s_{q2}(t_i - \tau_{q2}) + \tilde{p}_{q2}(t_i), \quad t_i \geq \tau_{q2}.$$

Одновременно вычисляются остаточные ряды

$$e_{q2}(t_i) = y_q(t_i) - \tilde{y}_{q2}(t_i), \quad q = \overline{1, Q},$$

которые обрабатываются одноступенчатым экспонен-

циальным фильтром для обнаружения моментов времени τ_{q3} появления третьего сигнала.

С моментов τ_{q3} повторяются операции пп. 1 – 7, выделяются сигналы $\hat{s}_{q3}(t_i - \tau_{q3})$, $t_i \geq \tau_{q3} + \Delta t$, вычисляются оценки $\hat{\phi}_3, \hat{\theta}_3$ и т.д. происходит обработка в пределах времени T .

В результате находится оценка числа объектов \hat{m}_1 как число обнаруженных моментов времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\hat{m}_1}$ и запоминаются оценки угловых координат $\hat{\phi}_{1k}, \hat{\theta}_{1k}$, $k = \overline{1, \hat{m}_1}$.

Обработка в частотной области

Алгоритм обработки в частотной области [4] следующий.

1. Последовательности $y_q(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, $i = \overline{1, n}$, запомненные на промежутке времени наблюдения длительностью T , подвергаются быстрому преобразованию Фурье. В результате в полосе доплеровских частот образуются спектры в виде комплексных последовательностей $\dot{S}_q(\omega_o(i))$, $i = \overline{1, n_1}$, $n_1 > n$, $q = \overline{1, Q}$.

2. Выделяются спектральные составляющие на \hat{m}_2 частотах, на которых амплитуды $|\dot{S}_q(\omega_o(i_k))|$ превышают порог обнаружения полезного сигнала во всех Q каналах.

3. Методом разности фаз $\psi_{qk} = \arg \dot{S}_q(\omega_o(i_k))$, взятых на выделенных частотах, находятся оценки угловых координат $\hat{\phi}_{2k}, \hat{\theta}_{2k}$, $k = \overline{1, \hat{m}_2}$, где \hat{m}_2 – оценка числа объектов, разрешенных по доплеровской частоте.

Замечание. Если все источники разрешены по доплеровской частоте, то точность оценок угловых координат, найденных в частотной области, в общем случае выше точности оценок, найденных во временной области, что обусловлено большей длительностью n частотной последовательности по сравнению с меньшей длительностью отдельных участков временной последовательности.

Частотно-временная обработка

Алгоритм совместной обработки сигналов во временной и частотной областях следующий.

1. Принятые сигналы одновременно обрабатываются во временной и частотной областях. Результатом обработки являются оценки угловых координат $\hat{\phi}_{1k}, \hat{\theta}_{1k}$, $k = \overline{1, \hat{m}_1}$, объектов, обнаруженных во временной области, и оценки координат $\hat{\phi}_{2k}, \hat{\theta}_{2k}$, $k = \overline{1, \hat{m}_2}$, объектов, обнаруженных в частотной области.

2. Если $\hat{m}_1 \leq \hat{m}_2$, то берутся оценки, найденные в частотной области.

3. Если $\hat{m}_1 > \hat{m}_2$, то в упрощенной версии алгоритма берутся оценки, найденные во временной области.

4. В усложненной версии в случае $\hat{m}_1 > \hat{m}_2$ осуществляется классификация оценок $\hat{\varphi}_{2k}, \hat{\theta}_{2k}, k = \overline{1, \hat{m}_2}$, на предмет их соответствия оценкам $\hat{\varphi}_{1k}, \hat{\theta}_{1k}, k = \overline{1, \hat{m}_1}$. Смысл классификации состоит в том, что приоритет имеют более точные оценки, найденные в частотной области. Но так как их количество \hat{m}_2 в данном случае меньше, чем \hat{m}_1 во временной области, то во временной области следует найти $\hat{m}_1 - \hat{m}_2$ оценок угловых координат объектов, которые не были обнаружены в частотной области. Эта стандартная задача классификации решается на основе критерия близости векторов оценок угловых координат с привлечением нормы разности векторов.

Замечание. Рассмотренный алгоритм частотно-временной обработки сигналов и сопутствующие ему алгоритмы обработки во временной и частотной областях следует все же отнести к эвристическим алгоритмам, так как они совместно не отвечают единому критерию синтеза. Поэтому эффективность работы алгоритмов проверялась компьютерным моделированием.

Результаты моделирования

Проводилось компьютерное моделирование трех алгоритмов: алгоритма обработки сигналов в частотной области, во временной области и частотно-временной области. Приемопередающая станция посылала непрерывный сигнал в сантиметровом диапазоне длин волн. Слежение за объектами осуществлялось в пределах круговой диаграммы направленности (ДН) в 2° на уровне 0,5 мощности. Параметры АР выбирались как $d_m = 3\lambda$, $d_z = 0,5\lambda$ при $\lambda = 0,03$ м. Принимаемые в АР сигналы переводились на промежуточную частоту f_n и моделировались с шагом дискретизации $\Delta t = 1/(8f_n)$, где $f_n = 10$ кГц. Фазовый шум действовал в каждом q -м канале по равномерному закону на $[0, \pi/10]$.

Объекты двигались с близкими скоростями от 10 до 11 м/с в направлении приемопередающей станции, первоначально удаленной от них на 1 км по радиальной дальности, и занимали по отношению к ней положение по двум угловым координатам от 29° до 31° . Сигналы от объектов приходили с разной задержкой по времени и моделировались преимущественно плохое разрешение по доплеровской частоте.

Считалось, что все объекты обнаружены правильно, если оценка \hat{m} числа объектов совпадала с числом m моделируемых объектов, оценки угловых координат объектов не выходили за пределы ширины ДН, а ошибки измерения угловой координаты азимута и угла места не превышали 1° .

В табл. 1 – 3 представлены результаты, полученные для двух объектов ($m = 2$) при 5000 реализациях в одинаковых условиях моделирования: зависимости средних значений $M[\rho]$ и СКО $\sigma[\rho]$ случайной величины ρ , имеющей смысл нормы вектора ошибок определения угловых координат φ и θ для обнаруженных объектов,

а также оценки вероятности \hat{P} правильного обнаружения всех объектов от отношения сигнал-шум (аддитивный шум p_q). Табл. 1 – алгоритм обработки в частотной области, табл. 2 – алгоритм обработки во временной области, табл. 3 – алгоритм обработки в частотно-временной области. На рис. 3 показаны зависимости оценки вероятности обнаружения одного объекта во временной области с применением оптимального измерителя фазы, обеспечивающего границу точности измерения фазы по неравенству Крамера-Рао [6], и измерителя фазы с помощью фильтра Калмана. Сравнение дает возможность определить условия применимости алгоритма частотно-временной обработки на уровне 14 – 20 дБ для обеспечения вероятности обнаружения не ниже 0,8. На рис.4 и 5 даны графики зависимости оценок вероятности правильного обнаружения двух и трех объектов от отношения сигнал-шум для всех алгоритмов.

Таблица 1. Алгоритм обработки в частотной области ($m = 2$)

Отношение сигнал-шум	Оценка угловой координат объектов (в градусах)		Вероятность обнаружения всех объектов
q (дБ)	$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	\hat{P}
14	0,355	0,129	0,703
16	0,354	0,128	0,706
18	0,352	0,127	0,707
20	0,352	0,126	0,711

Таблица 2. Алгоритм обработки во временной области ($m = 2$)

Отношение сигнал-шум	Оценка угловой координат объектов (в градусах)		Вероятность обнаружения всех объектов
q (дБ)	$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	\hat{P}
14	0,605	0,201	0,586
16	0,560	0,192	0,707
18	0,507	0,185	0,800
20	0,461	0,169	0,840

Таблица 3. Алгоритм обработки в частотно-временной области ($m = 2$)

Отношение сигнал-шум	Оценка угловой координат объектов (в градусах)		Вероятность обнаружения всех объектов
q (дБ)	$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	\hat{P}
14	0,406	0,176	0,877
16	0,402	0,171	0,917
18	0,398	0,159	0,939
20	0,383	0,150	0,958

Видно (табл. 1 – 3) что при близких показателях точности правильных оценок алгоритм частотно-временной обработки имеет преимущество по вероятности правильного определения положения объектов. Рис. 4 – 5 также подтверждают преимущество третьего алгоритма.

Преимущество временной обработки по сравнению с частотной по вероятности обнаружения всех объектов при отношении сигнал-шум 20 дБ выражается в повышении вероятности с 0,71 до 0,84, а частотно-временной обработки – в повышении вероятности с 0,71 до 0,96.

Оценка сложности и быстродействия алгоритмов

При обработке в частотной области применялось БПФ, сложность которого $O(n \log_2 n)$, где n – число отсчетов сигнала. При обработке во временной области применялся экспоненциальный сглаживающий фильтр для оценивания частоты и

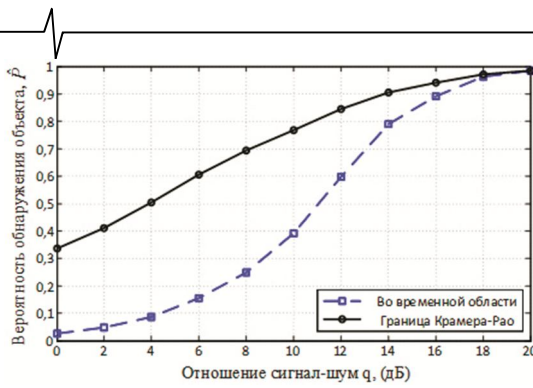


Рис. 3. Сравнение с границей Крамера – Рао

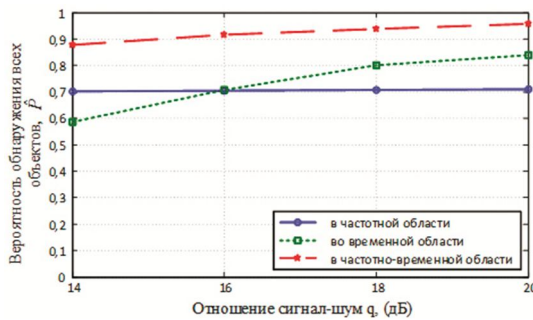


Рис. 4. Зависимости вероятности обнаружения всех объектов от отношения сигнал-шум для двух объектов

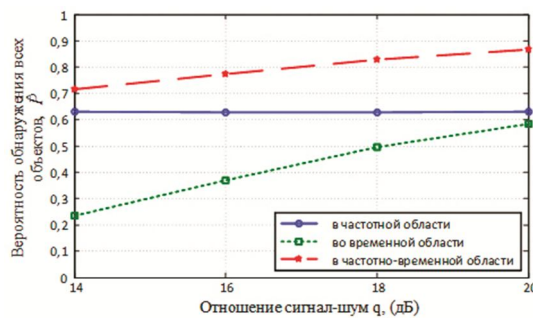


Рис. 5. Зависимости вероятности обнаружения всех объектов от отношения сигнал-шум (для трех объектов)

фильтр Калмана для оценивания фазы. Сложность экспоненциального фильтра второго порядка $O(4n)$, сложность фильтра Калмана с учетом матричных операций $O(138M)$, где M — число отсчетов сигналов для оценки фазы, причем для предварительно сглаженного сигнала достаточно $M = 20$. В работе рассматривалась последовательность отсчетов длительностью $n = 3200$.

За счет параллельной обработки радиосигналов в частотной и во временной области в расчете сложности принимается наибольшая сложность из двух параллельных операций. В табл. 4 показано количество N операций умножения, необходимое для оценивания частоты и фазы. Операции умножения в современных процессорах могут быть произведены за несколько тактов. Так, число тактов процессора Intel Core i9-9900K, 3,6 ГГц, необходимое при выполнении операции умножения 32 разрядных чисел с плавающей запятой, составляет 2 – 5 тактов. С учетом этого в табл. 4 показано время T (мс), необходимое для выполнения операций.

Расчет показывает двукратное преимущество временной обработки в количестве операций по сравнению с частотной обработкой. Частотно-временная обработка не имеет такого преимущества, так как операции производятся параллельно во временной и частотной областях, а оценка затрат дается по

максимум из двух возможных. Время обработки может быть снижено при использовании специализированных программно-аппаратных средств (FPGA, ASIC), реализация которых на ПЛИС позволиткратно снизить время вычислений.

Таблица 4. Количество операций и время обработки

Обработка	N	T (мс)
Частотная	32760	0,0455
Временная	15560	0,0216
Частотно-временная	32760	0,0455

Заключение

В плане обнаружения нескольких объектов и определения их угловых координат в многоканальной доплеровской РЛС рассмотрены в сравнении три алгоритма обработки сигналов отражения – обработки во временной области, в частотной области и совместной частотно-временной обработки. Для обработки во временной области предложен подход к выделению сигналов от каждого объекта из смеси сигналов, основанный на экстраполяции первоначально выделенных сигналов, их вычитании из сглаженной смеси сигналов и оценивании фазы с помощью фильтра Калмана. Для обработки в частотной области рассмотрен известный подход выделения спектральных составляющих смеси в спектрах доплеровских частот с последующим определением угловых координат методом разности фаз.

Для возможности различения объектов, движущихся с близкими векторами скорости и моментами времени прихода сигналов, предложен алгоритм частотно-временной обработки, основанный на сравнении числа сигналов от объектов, выделенных во временной и частотной областях, а также координат объектов. Представленные результаты компьютерного моделирования показывают преимущество частотно-временного подхода. Алгоритм частотно-временной обработки сигналов может найти применение в существующих радиосистемах пеленгации движущихся с близкими скоростями нескольких объектов. Перспектива исследований направлена на изучение технических возможностей применения данного алгоритма как в отдельной доплеровской РЛС, так и в полуактивной системе позиционирования приемников [7].

Литература

1. F. Hlawatsch, G. Matz, H. Kirchauer, and W. Kozek. Time-frequency formulation, design, and implementation of time-varying optimal filters for signal estimation, IEEE Trans. Signal Process., 48, 1417-1432 pp., May 2000.
2. K. Gharthey, A. Papandreou-Suppappola, and D. Cochran. On the Use of Matching Pursuit Time-Frequency Techniques for Multiple-Channel Detection, in Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 5, 3201-3204, May 2001.
3. Papandreou-Suppappola, Antonia, Applications in time-frequency signal processing (Electrical engineering and applied signal processing series), New York, 2002, 397 p.
4. Ключко В.К., Бу Б. Х. Частотно-временная обработка сигналов в доплеровском радиоприемнике. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 15-21.
5. Ключко В.К., Кузнецов В.П., Бу Ба Хунг. Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. Вып. 80. С. 12-23.
6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
7. Ключко В.К., Бу Ба Хунг. Обнаружение подвижных источников системой радиоприемников. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 50-55.