

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ СИСТЕМОЙ РАДИОПРИЕМНИКОВ

*Клочко В.К., д.т.н., профессор РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: klochkovk@mail.ru
 Ву БаХунг, аспирант РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: ronando2441996@gmail.com*

MOBILE SOURCES DETECTION BY A RECEIVER SYSTEM

Klochko V.K., Hung Vu Ba

The problem of detecting several mobile sources by a system of several mutually oriented radio receivers at given range boundaries at current moments is solved. Based on the signals received in the receivers, a decision is made on the presence of sources, their number, spatial coordinates and velocity vectors are determined. The formula is based on the algebraic criterion for classifying direction vectors into sources according to the principle of their conjugation. The purpose of the work – to increase the efficiency of the radio receiver positioning system when detecting useful signals from mobile low-altitude sources in conditions of interference. It is proposed to increase efficiency of sources detection due to location of receivers in a certain way, coordinated operation of receiver-producing station with several auxiliary receivers when processing Doppler frequency spectra of received signals using algebraic criteria. Computer simulation results are provided showing the advantage of operating the system over a single transceiver station. The applied orientation of the work – algorithmic support of radio systems for the protection of small areas and ultrasound diagnostics devices.

Key words: radio signals, Doppler receivers, signal detection, parameter estimates, velocity vector estimates, mathematical and computer modeling.

Ключевые слова: радиосигналы, доплеровские приемники, обнаружение сигналов, оценки параметров, оценки векторов скоростей, математическое моделирование.

Введение

Задача обнаружения полезного сигнала от источника на фоне помех является классической в радиотехнике и широко освещена в научной и учебной литературе [1]. При наличии нескольких движущихся источников задача усложняется классификацией сигналов по принадлежности тому или иному источнику. Обычно такую классификацию осуществляют на этапе вторичной (траекторной) обработки сигналов, если они приняты одним приемником. Наличие нескольких приемников расширяет возможности получения информации о параметрах движения источников на этапе первичной обработки сигналов. Задаче обнаружения полезного сигнала в системе нескольких приемников также уделено внимание [1]. При этом параметры движения отдельного источника – пространственное положение и векторы скорости, как правило, находят из геометрических соображений. Однако геометрический подход не дает алгебраически выраженного критерия обнаружения, позволяющего обоснованно осуществлять классификацию сигналов и отсеивать ложные сигналы при поиске нескольких источников в условиях помех.

Цель работы – повышение эффективности работы системы позиционирования радиоприемников при обнаружении полезных сигналов от подвижных источников в условиях помех в текущие моменты времени наблюдения.

Решается задача обнаружения нескольких подвижных источников системой нескольких взаимно ориентированных радиоприемников на заданных дальностях в текущие моменты времени. На основе принятых в приемниках сигналов принимается решение о наличии источников, оценивается их число, пространственные координаты и векторы скорости движения. В основе решения лежит алгебраический критерий классификации векторов направлений на источники по принципу их сопряжения. Цель работы – повышение эффективности работы системы позиционирования радиоприемников при обнаружении полезных сигналов от подвижных источников в условиях помех. Предлагается повысить эффективность обнаружения источников за счет расположения определенным образом приемников, согласованной работы приемопередающей станции и вспомогательных приемников при обработке спектров доплеровских частот принятых сигналов с использованием алгебраических критериев. Приводятся результаты компьютерного моделирования, показывающие преимущество работы системы по сравнению с одной приемопередающей станцией. Прикладная направленность работы – алгоритмическое обеспечение радиосистем охраны малых территорий и приборов ультразвуковой диагностики.

Постановка задачи и обзор известных подходов

Рассматривается многопозиционная полуактивная радиосистема наблюдения за маловысотными подвижными источниками. Система наблюдения состоит из одной приемопередающей радиостанции, работающей в режиме фазовой манипуляции с кодом Баркера, и нескольких (двух и более) доплеровских радиоприемников с антенными решетками (АР), взаимно ориентированных в единой прямоугольной системе координат, синхронизированных с передатчиком и принимающих сигналы отражения в сантиметровом диапазоне длин волн на малых дальностях.

Требуется на основе принятых сигналов на промежутках времени, соответствующих элементам разрешения дальности, обнаружить наличие полезных сигналов, принадлежащих искомым источникам, число источников, их пространственные координаты и векторы скорости движения. К помехам относятся сигналы, принятые приемниками от посторонних источников, находящиеся вне зоны действия передатчика.

Для обнаружения и нахождения пространственных координат подвижного источника и вектора скорости его движения часто используется активная система позиционирования трех доплеровских приемопередающих радиостанций, каждая из которых определяет угловое направление на объект, радиальную дальность по задержке времени прихода зондирующего сигнала и в совокупности три станции определяют вектор скорости источника на основе трех измеренных радиальных проекций вектора скорости [1]. В более экономичных полупассивных системах позиционирования используется внешний передатчик и несколько пространственно удаленных приемников. Так, в работах [2, 3] четыре взаимно ориентированных приемника принимают отраженные сигналы от источников, излученные внешним передатчиком. Приемники определяют орты векторов направлений на источники сигналов, группируют орты по принадлежности объектам по критерию сопряжения ортов с определением дальностей до них, пространственных координат и вектора скорости. Однако в [2, 3] не указано пространственное положение приемников и передатчика. Рассмотрен преимущественно случай известного числа источников и не показан способ их обнаружения. Не раскрыта возможность повышения разрешения по доплеровской частоте за счет согласованной работы приемников и передатчика при обработке принимаемых сигналов. В работе [4] показана идея повышения разрешения по доплеровской частоте для системы, состоящей из одного передатчика и одного приемника без возвращенного алгоритма применения этой идеи.

Заметим, что известен ряд аналитических методов сверхразрешения по угловым координатам (и доплеровской частоте) в одном радиоприемнике, например, MUSIC, Кейпона, Писаренко, Прони [5, 6] и др. Однако они требуют определенных условий применения и дополнительных вычислительных затрат на реализацию. В работе предлагается другой подход к сверхразрешению по доплеровской частоте, основанный на использовании совместно с приемопередающей станцией нескольких (от двух и более) вспомогательных приемников. Положительный эффект достигается за счет расположения определенным образом приемников, согласованной работы приемопередающей станции и вспомогательных приемников при обработке спектров доплеровских частот принятых сигналов на основе алгебраических критериев. Такой подход позволяет наряду со сверхразрешением находить оценки векторов скоростей подвижных источников.

Модель сигнала

Передатчик посылает непрерывный гармонический сигнал с фазовой манипуляцией по коду Баркера. Приемники синхронизированы с работой передатчика. Это

позволяет разделять принимаемый сигнал по времени на промежутки по элементам разрешения дальности. На промежутке времени $[t_\mu, t_\mu + T]$, T – период фазовой манипуляции, соответствующем μ -у элементу разрешения дальности $[R_\mu, R_\mu + \Delta R]$, модель принимаемого сигнала в q -м приемном элементе AP k -го приемника ($k = \overline{1, n}$, n – число приемников) от одного точечного источника отражения в комплексной (аналитической) форме имеет вид [7]:

$$\bar{s}_{qk}(t) = A_{0k} e^{j\psi_{qk}}, \quad q = \overline{1, Q},$$

$$A_{0k} = \gamma U_{0k} G_k(\varphi, \theta), \quad \psi_{qk} = \omega_0(t - \tau_{qk}) + \xi_q, \quad t \in [0, T], \quad (1)$$

где γ – мультипликативный шум; $U_{0k} = U_0(r_1 + r_k, P_0)$ – амплитуда сигнала, зависящая от дальности $r_1 = R_\mu$ и расстояния r_k между источником отражения и центром k -го приемника, а также мощности передатчика P_0 ; $\dot{G}_k(\varphi_k, \theta_k)$ – диаграмма направленности (ДН) k -й антенны, зависящая от угловых координат азимута φ и угла места θ источника в k -й антенной системе координат. В составе фазы $\psi_{qk} : j$ – мнимая единица; ω_0 – несущая круговая частота; $\xi_q = \phi_0 + \eta_q$ – случайная величина, зависящая от начальной фазы ϕ_0 и фазового шума η_q в q -м канале; τ_{qk} – время прихода отраженного сигнала в q -й приемный элемент AP k -го приемника; Q – число приемных каналов.

Величина τ_{qk} в k -м приемнике для точечного объекта, движущегося в текущий момент времени t , $t \in [0, T]$, с вектором скорости \vec{v} , имеет вид

$$\tau_{qk} = (r_1 + r_k + \delta_{qk} + (\text{пр}\vec{v} + \text{пр}\vec{v}) \cdot \vec{a}_k) / c =$$

$$= (r_1 + r_k + \delta_{qk} + (v_{r_1} + v_{rk}) \cdot t) / c, \quad k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где δ_{qk} отклонение (с определенным знаком) фронта волны отраженного сигнала, достигшего центра q -го приемного элемента k -го приемника, по сравнению с центром AP; $\vec{a}_k = (a_{kx}, a_{ky}, a_{kz})$ – орт вектора направления на источник от k -го приемника; $\text{пр}\vec{v} = (\vec{v}, \vec{a}_k) = v_{rk}$ – отрицательная проекция вектора \vec{v} скорости источника на направление \vec{a}_k при его движения в сторону k -го приемника, выраженная через скалярное произведение векторов \vec{v} и \vec{a}_k ; c – скорость света.

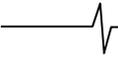
С учетом (2) выражение фазы в (1) запишется как

$$\psi_{qk} = \omega_0 [1 - (v_{r_1} + v_{rk}) / c] \cdot t -$$

$$- 2\pi(r_1 + r_k + \delta_{qk}) / \lambda + \xi_q, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где учтено $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi c / \lambda$.

После перехода на промежуточную частоту $\omega_{np} \ll \omega_0$ и дискретизации по времени выражение (3) с учетом доплеровского сдвига частоты $\omega_{dk} = -\omega_0(v_{r_1} + v_{rk}) / c$ принимает вид



$$\psi_{qkj} = (\omega_{np} + \omega_{ok}) \cdot t_j - 2\pi(r_1 + r_k) / \lambda - 2\pi\delta_{qk} / \lambda + \xi_q, \quad j = \overline{1, L}, \quad (4)$$

где t_j – дискретные отсчеты времени, $t \in [0, T]$; L – длина временной последовательности.

Определение направлений на источники

Величина δ_{qk} в (4) содержит информацию о координатах орта \vec{a}_k вектора направления на источник. Орт \vec{a}_k представлен как

$$\vec{a}_k = (a_{kx}, a_{ky}, a_{kz}) = (X_k, Y_k, Z_k) / r_k, \quad a_{kz} = \sqrt{1 - a_{kx}^2 - a_{ky}^2}, \quad (5)$$

где X_k, Y_k, Z_k – пространственные координаты источника в антенной прямоугольной системе координат k -го приемника.

Приемные элементы АР располагаются на плоскости антенны в точках с координатами (x_q, y_q) , которые описываются радиус-векторами $\vec{m}_q = (x_q, y_q, 0)$, тогда

$$\delta_{qk} = \text{пр}_{\vec{a}_k} \vec{m}_q = (\vec{m}_q, \vec{a}_k) = x_q \cdot a_{kx} + y_q \cdot a_{ky}. \quad (6)$$

При переходе к частотному спектру выделяются i -е спектральные составляющие в q -х каналах, амплитуды которых во всех Q каналах превышают порог обнаружения полезного сигнала ($i = \overline{1, m_k}$, m_k – число таких составляющих в k -м приемнике). Фазы выделенных составляющих имеют вид

$$\psi_{qki} = -2\pi(r_1 + r_k) / \lambda - 2\pi\delta_{qki} / \lambda + \xi_q, \quad (7)$$

$$k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m_k}.$$

При вычитании фаз (7) разных q -х каналов исключаются те величины, которые не зависят от q . Тогда на основе разностей $\Delta\psi_{qki}$ с учетом (6) находятся оценки

координат $\hat{a}_{kxi}, \hat{a}_{kyi}$, $\hat{a}_{kzi} = \sqrt{1 - \hat{a}_{kxi}^2 - \hat{a}_{kyi}^2}$, $k = \overline{1, n}$, ортов \vec{a}_{ki} направлений на i -е источники со стороны k -х приемников с точностью до ошибок разностей $\Delta\xi_q$.

Правило обнаружения объектов и нахождения оценок дальностей

Факт присутствия полезных сигналов отражения на дальности r_1 устанавливается в приемнике передающей станции ($k=1$) выделением в спектре доплеровских частот составляющих, амплитуда которых превышает порог обнаружения полезного сигнала во всех q -х приемных каналах ($q = \overline{1, Q}$). Однако точное число источников, расположенных в одном элементе разрешения дальности и имеющих близкие радиальные проекции скоростей, в спектре одной приемопередающей станции определить не всегда возможно из-за ограниченной разрешающей способности по доплеровской частоте. По этой причине целесообразно увеличить число приемников до n ($n \geq 3$).

В спектрах n приемников выделяются доплеровские частоты и методом разности фаз определяются век-

торы направления на источники сигналов \vec{a}_{ki} , $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m_k}$, где m_k – число доплеровских частот и соответственно ортов, найденных в k -м приемнике.

В качестве критерия обнаружения объектов принимается правило сопряжения групп векторов, то есть их направления на одни и те же источники. Пусть n векторов $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$ выбраны правильно по направлению на один и тот же источник в n приемниках. Установим парную связь между первым и k -ми векторами ($k = \overline{2, n}$) в единой прямоугольной системе координат $OXYZ$ в матричной форме:

$$r_1 a'_1 = (b_k - b_1) + r_k a'_k + e_{1k}, \quad k = \overline{2, n},$$

где $r_1 = R_{\mu}$; $a'_k = H_k a_k$, $k = \overline{1, n}$, H_k – 3×3 -матрицы поворота осей k -й антенной системы координат по отношению к общей системе; a_k – 3×1 -векторы-столбцы координат ортов; b_k – базовые векторы, соединяющие центр единой системы с центрами антенных систем координат; e_{1k} – 3×1 -векторы-столбцы ошибок сопряжения указанных пар векторов.

Критерием сопряжения пар векторов a'_1 и a'_k , $k = \overline{2, n}$, в указанной группе n векторов будет сумма квадратов норм векторов ошибок:

$$J = \sum_{k=2}^n \|e_{1k}\|^2 = \quad (8)$$

$$= \sum_{k=2}^n (r_1 a'_1 - \Delta b_{1k} - r_k a'_k)^T \cdot (r_1 a'_1 - \Delta b_{1k} - r_k a'_k),$$

где $\Delta b_{12} = b_2 - b_1$; $\Delta b_{13} = b_3 - b_1$; T – символ транспонирования.

Из необходимого условия существования экстремума функции (8)

$$dJ / dr_k = 0 \Rightarrow 2(r_1 a'_1 - \Delta b_{1k} - r_k a'_k)^T (-a'_k) = 0, \quad k = \overline{2, n},$$

с учетом $a_k^T a'_k = 1$ находим оценки дальностей \hat{r}_k :

$$\hat{r}_k = a_k^T (r_1 a_1 - \Delta b_{1k}), \quad k = \overline{2, n}, \quad (9)$$

удовлетворяющие достаточному условию минимума (8)

$$d^2 J / dr_k^2 = 2a_k^T a'_k = 2 > 0, \quad k = \overline{2, n}.$$

Оценки $\hat{r}_2, \dots, \hat{r}_n$ подставим в выражение показателя сопряжения (8). Полученное его значение \hat{J} характеризует правильность сопряжения векторов a'_1, a'_2, \dots, a'_n в данной их комбинации. Для исключения векторов a_k , $k \in \{2, 3, \dots, n\}$, полученных в k -х приемниках вследствие приема ложных сигналов (помех) отражения от источников, расположенных вне зоны видимости передающей станции (вне элемента дальности r_1), наложим ограничение на величину показателя (8) в виде порога γ , выбираемого эмпирически.

Если $J > \gamma$, то принимается решение о наличии помехи и комбинация a'_1, a'_2, \dots, a'_n исключается из рассмотрения. Комбинации, удовлетворяющие условию $J \leq \gamma$, подвергаются дальнейшему анализу.

Замечание. Учитывая то, что оценки дальностей (9) находятся независимо для каждой пары векторов a'_k , $k = \overline{2, n}$, в группе a'_1, a'_2, \dots, a'_n , показатель (8) можно разделить на $n-1$ показателей \hat{J}_{1k} , $k = \overline{2, n}$:

$$\hat{J}_{1k} = \|e_{1k}\| = (\hat{r}'_1 a'_1 - \Delta b_{1k} - \hat{r}'_k a'_k)^T \cdot (\hat{r}'_1 a'_1 - \Delta b_{1k} - \hat{r}'_k a'_k).$$

При этом правило обнаружения становится более жестким: в группе векторов a'_1, a'_2, \dots, a'_n для всех пар a'_1, a'_k , $k = \overline{2, n}$, должно выполняться условие

$$\hat{J}_{1k} \leq \gamma_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad \gamma_k = \gamma / (n-1). \quad (10)$$

В противном случае, если хотя бы одно из неравенств (10) не выполняется, группа считается ложной.

Группы $\{a'_1, a'_2, \dots, a'_n\}_s$, прошедшие через порог γ или γ_k , где s – номер группы, могут иметь общие векторы (пересекаться). Это связано с тем, что в силу разного пространственного расположения приемников объекты, имеющие близкие скорости, в отдельных приемниках могут восприниматься как один объект на одной доплеровской частоте и с одним направляющим вектором, а в других приемниках – как два объекта, различимые на двух доплеровских частотах и имеющие два направляющих вектора. Поэтому группы векторов, отнесенные к разным источникам, могут пересекаться.

Для обнаружения числа объектов предлагается следующее правило.

1. Из всех s -х групп $\{a'_1, a'_2, \dots, a'_n\}_s$, прошедших через порог, выбирается группа с наименьшим значением суммарного показателя $\hat{J} = \sum_{k=2}^n \hat{J}_{1k}$. Запоминаются соответствующие выбранной группе доплеровские частоты $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}_s$. Группы, частично пересекающиеся с выделенной, то есть имеющие допустимое общее число n_{\min} векторов, $1 \leq n_{\min} \leq n-1$, сохраняются для дальнейшего рассмотрения. Группы, не удовлетворяющие этому условию (число пересечений превышает n_{\min}), исключаются из дальнейшего рассмотрения. Число n_{\min} выбирается эмпирически.

2. Из оставшихся групп выбирается вторая с наименьшим значением показателя \hat{J} и исключаются группы, имеющие с выбранной более n_{\min} общих векторов. Запоминаются соответствующие доплеровские частоты.

3. Процедура повторяется до тех пор, пока не получится пустое множество оставшихся групп. Число m выбранных частично пересекающихся групп принимает за оценку числа обнаруженных объектов.

4. Для каждой выбранной группы векторов a'_1, a'_2, \dots, a'_n находятся векторы оценок пространственных координат объекта $\hat{M}_1 = \hat{r}'_1 a'_1$, $\hat{M}_2 = \hat{r}'_2 a'_2, \dots, \hat{M}_n = \hat{r}'_n a'_n$ в антенных системах координат приемников и усредняются при пересчете в общую систему координат.

Нахождение вектора скорости

Для каждой выделенной группы векторов a'_1, a'_2, \dots, a'_n и запомненных соответствующих доплеровских частот

f_1, f_2, \dots, f_n определим координаты вектора скорости источника. Для этого запишем выражение доплеровской частоты в k -х приемниках:

$$\omega_{ok} = -\omega_0(v_{r_1} + v_{r_k}) / c = -2\pi(v_{r_1} + v_{r_k}) / \lambda \quad \text{или}$$

$$f_{ok} = -(v_{r_1} + v_{r_k}) / \lambda, \quad k = \overline{1, n},$$

и выразим проекции скорости через скалярные произведения векторов, взятые в общей системе координат:

$$\lambda f_{ok} = (\vec{v}, \vec{a}'_1) + (\vec{v}, \vec{a}'_k) = (\vec{v}, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_k), \quad k = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Систему уравнений (11) запишем в координатной форме

$$\lambda f_{ok} = v_x(a'_{1x} + \vec{a}'_{kx}) + v_y(a'_{1y} + \vec{a}'_{ky}) + v_z(a'_{1z} + \vec{a}'_{kz}), \quad k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

В частном случае $n = 3$ система уравнений (12) записывается в матричной форме

$$A \cdot V = \lambda F \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2a'_{1x} & 2a'_{1y} & 2a'_{1z} \\ a'_{1x} + a'_{2x} & a'_{1y} + a'_{2y} & a'_{1z} + a'_{2z} \\ a'_{1x} + a'_{3x} & a'_{1y} + a'_{3y} & a'_{1z} + a'_{3z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_{o1} \\ f_{o2} \\ f_{o3} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Методом обратной матрицы находим оценку вектора скорости

$$\hat{V} = \lambda A^{-1} F. \quad (14)$$

В общем случае n приемников ($n > 3$) матрица A и вектор F в (13) будут содержать по n строк, а оценка вектора скорости с учетом ошибок измерения доплеровской частоты найдется по критерию минимума суммы квадратов этих ошибок (методом наименьших квадратов) как

$$\hat{V} = \lambda (A^T A)^{-1} A^T F. \quad (15)$$

В частном случае $n = 3$ формула (15) сводится к (14).

Подход к повышению разрешения по доплеровской частоте

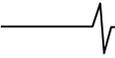
Рассмотрим случай одного приемопередатчика и одного приемника ($n = 2$). Пусть два объекта A и B находятся в одном элементе разрешения дальности r_1 и имеют векторы скорости \vec{v}_A и \vec{v}_B . Вектор \vec{v}_A направлен в сторону передатчика ($\vec{v}_A \parallel \vec{a}'_1$), а вектор \vec{v}_B составляет с вектором \vec{v}_A небольшой угол $\Delta\alpha$. Объект A в первом и втором приемниках дает доплеровские частоты $f_{A1} = (\vec{v}_A, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_1) / \lambda$ и $f_{A2} = (\vec{v}_A, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_2) / \lambda$. Объект B в первом и втором приемниках дает доплеровские частоты $f_{B1} = (\vec{v}_B, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_1) / \lambda$ и $f_{B2} = (\vec{v}_B, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_2) / \lambda$.

Абсолютные разности доплеровских частот в первом и втором приемниках составляют

$$\Delta f_1 = |f_{A1} - f_{B1}| = |(\vec{v}_A - \vec{v}_B, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_1)| / \lambda = |\vec{v}_A - \vec{v}_B| \cdot |\vec{a}'_1 + \vec{a}'_1| \cdot |\cos \gamma_1| / \lambda,$$

$$\Delta f_2 = |f_{A2} - f_{B2}| = |(\vec{v}_A - \vec{v}_B, \vec{a}'_1 + \vec{a}'_2)| / \lambda = |\vec{v}_A - \vec{v}_B| \cdot |\vec{a}'_1 + \vec{a}'_2| \cdot |\cos \gamma_2| / \lambda.$$

В первом приемнике при малом угле $\Delta\alpha$ разностный вектор $\Delta\vec{v} = \vec{v}_A - \vec{v}_B$ расположен относительно вектора \vec{v}_A и соответственно вектора \vec{a}'_1 ($\vec{v}_A \parallel \vec{a}'_1$) под углом,



близким 90^0 : $\Delta\alpha \rightarrow 0 \Rightarrow \gamma_1 \rightarrow 90^0$, где γ_1 – угол между векторами $\Delta\vec{v}$ и \vec{a}'_1 . Поэтому разность доплеровских частот в первом приемнике будем мала, что дает плохое разрешение по доплеровской частоте.

Во втором приемнике разностный вектор $\Delta\vec{v} = \vec{v}_A - \vec{v}_B$ составляет с суммарным направляющим вектором $\vec{a}_\Sigma = \vec{a}'_1 + \vec{a}'_2$ угол γ_2 и абсолютная разность доплеровских частот будет зависеть от этого угла. Заранее трудно рассчитать, каким должно быть наилучшее положение векторов направлений \vec{a}'_1 и \vec{a}'_2 .

Однако, в частном случае, когда вектор скорости \vec{v}_A направлен в сторону передатчика, а вектор \vec{v}_B , $|\vec{v}_B| = |\vec{v}_A| = v$, составляет с ним малый угол $\Delta\alpha$, при наличии нескольких приемников найдется k -й приемник, для которого векторы \vec{v}_A , \vec{v}_B , \vec{a}'_1 и \vec{a}'_k практически окажутся в одной плоскости. Тогда абсолютная разность двух доплеровских частот в спектре первого приемника составит

$$\Delta f_1 = |2v - 2v \cos \Delta\alpha| / \lambda = 2v |1 - \cos \Delta\alpha| / \lambda.$$

Абсолютная разность доплеровских частот в спектре k -го приемника, линия визирования которого отклонена от линии визирования первого на угол α , будет

$$\Delta f_k = v |1 - \cos \Delta\alpha + [\cos \alpha - \cos(\alpha - \Delta\alpha)]| / \lambda.$$

Дифференцированием Δf_k по α при фиксированном $\Delta\alpha$ с раскрытием модуля найдется угол, обеспечивающий наибольшее различие доплеровских частот в k -м приемнике:

$$\alpha = \arctg(\sin(\Delta\alpha) / (1 - \cos \Delta\alpha)),$$

что для значений $\Delta\alpha = 1^0 - 10^0$ дает углы $\alpha = 85^0 - 89,5^0$, близкие к 90^0 [4].

Во втором приемнике разность доплеровских частот зависит от угла α , которой значительно больше угла $\Delta\alpha$. Поэтому во втором приемнике разность доплеровских частот больше, чем в первом, и соответственно лучше разрешения по частоте.

Возможно альтернативное решение при наличии n ($n \geq 3$) приемопередающих станций с последовательным излучением, но с учетом операций предлагаемого подхода. При этом увеличится точность определения дальностей и улучшится разрешение по доплеровской частоте за счет увеличения Δf_k :

$$\Delta f_k = 2v |\cos \alpha - \cos(\alpha - \Delta\alpha)| / \lambda.$$

Однако при этом в n раз повысится энергопотребление.

Таким образом, при совместном рассмотрении спектров приемопередающей станции и спектров вспомогательных приемников, расположенных относительно станции определенным образом, найдется спектр с наибольшим числом различных доплеровских частот, что дает эффект повышения разрешения по доплеровской частоте.

Алгоритм обнаружения объектов

Подводя итог, сформулируем следующий алгоритм обнаружения объектов.

1. Размещается приемопередающая станция. Передатчик излучает зондирующий сигнал $s(t)$ в заданном угловом направлении и совмещенный с ним приемник принимает отраженный сигнал с временной задержкой $\tau_1 = 2r_1 / c$ на радиальной дальности r_1 . Размещаются $n-1$ ($n \geq 3$) удаленных от передатчика приемников так, чтобы линии визирования всех приемников, направленные в сторону зоны видимости передатчика, составляли между собой углы, близкие к 90^0 , что обеспечивает наилучшее разрешение по доплеровской частоте по совокупности всех частотных спектров.

2. k -е приемники ($k = \overline{1, n}$) принимают отраженный сигнал $\dot{s}_{qk}(t - \tau_{qk})$ в q -х элементах АР с временной задержкой или опережением τ_{qk} ($q = \overline{1, Q}$), затем в трактах первичной обработки переводят принятые сигналы на промежуточную частоту и преобразуют сигналы в цифровую форму $\dot{s}_{qk}(t_j - \tau_{qk})$, $q = \overline{1, Q}$, $j = \overline{1, n}$.

3. Временные последовательности $\dot{s}_{qk}(t_j - \tau_{qk})$ переводятся в частотные спектры $\dot{s}_{qk}(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$, $j = \overline{1, n}$, и выделяются спектральные составляющие на i -х доплеровских частотах f_{qki} , на которых амплитуды спектральных составляющих во всех спектрах q -х каналов ($q = \overline{1, Q}$) превышают порог обнаружения полезного сигнала ($i = \overline{1, m_k}$, m_k – число таких частот в k -м приемнике). Если наличие источников на дальности r_1 не обнаружено в спектре приемопередающей станции, то повторяется обработка сигнала, принятого на другой дальности. Если наличие обнаружено, то включаются в работу $n-1$ вспомогательных приемников.

4. На основе выделенных во всех приемниках спектральных составляющих определяются методом разности фаз координаты ортов \vec{a}_{ki} i -х направлений ($i = \overline{1, m_k}$) на источники со стороны k -х приемников ($k = \overline{1, n}$). Запоминаются соответствующие ортам доплеровские частоты f_{ki} , $k = \overline{1, n}$.

5. Осуществляется перебор соединений $\vec{a}_{1i}, \vec{a}_{2i}, \dots, \vec{a}_{ni}$, $i = \overline{1, m_k}$, $k = \overline{1, n}$, в группы из n векторов и выделяются частично пересекающиеся s -е группы $\vec{a}_{1s}, \vec{a}_{2s}, \dots, \vec{a}_{ns}$, $s = \overline{1, m}$, общим числом m , удовлетворяющие критерию сопряжения – направления на одни и те же источники. Запоминаются соответствующие этим группам доплеровские частоты $f_{1s}, f_{2s}, \dots, f_{ns}$, $s = \overline{1, m}$. Объект считается обнаруженным в s -й группе векторов, если величина показателя сопряжения не превышает заданного по-

Таблица. Результаты моделирования

Только приемопередающая станция			Система из приемопередающей станции и двух вспомогательных приемников			
Оценка положения объектов		Вероятность обнаружения объектов	Оценка положения объектов		Оценка скорости	Вероятность обнаружения объектов
$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	D	$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	$M[v]$	D
0,658	0,421	0,818	0,522	0,297	0,399	0,910

рога γ . При этом число m принимается за оценку числа обнаруженных объектов.

6. На основе найденных для каждой s -й группы $\vec{a}_{1s}, \vec{a}_{2s}, \vec{a}_{3s}$ радиальных дальностей r_{2s}, r_{3s} (дальность r_1 известна: $r_{1s} = r_1 = R_\mu$) вычисляются пространственные координаты обнаруженных объектов $\vec{M}_{ks} = r_{ks} \cdot \vec{a}_{ks}$, $k = \overline{1, n}$, $s = \overline{1, m}$.

7. Для каждой s -й выделенной группы ($s = \overline{1, m}$) координаты ортов $\vec{a}_{1s}, \vec{a}_{2s}, \dots, \vec{a}_{ns}$ помещаются в состав $(n \times 3)$ -матрицы A_s и вычисляется вектор скорости s -х источников по формуле (15) как $V_s = \lambda (A_s^T A_s)^{-1} A_s^T F_s$, где λ – длина волны, а F_s – n -вектор-столбец доплеровских частот $f_{1s}, f_{2s}, \dots, f_{ns}$.

8. Операции 2 – 7 повторяются для других элементов разрешения дальности $[R_{\mu+1}, R_{\mu+1} + \Delta R]$, где $R_{\mu+1} < R_\mu$.

9. Если отказывает приемопередающая станция, то операции повторяются с участием резервной станции, ориентированной относительно приемников.

Результаты моделирования

Математическое моделирование сигналов осуществлялось в соответствии с изложенными моделями для случая $n = 3$. Приемопередающая станция посылала непрерывный сигнал с фазовой манипуляцией по коду Баркера в сантиметровом диапазоне длин волн. Зондирующий сигнал имел период фазовой манипуляции $T = 6,6$ нс. Принимаемые в приемниках сигналы моделировались в соответствии с (1) на промежуточной частоте $f_n = 300$ МГц с шагом дискретизации $\Delta t = 1 / (4f_n)$. Параметры АР выбирались с учетом возможности устранения неоднозначности измерения фазы. Движение двух объектов в сторону станции задавалось по линейному закону. Скорость первого объекта выбиралась случайным образом на промежутке от 10 до 15 м/с, вектор скорости второго объекта, равный по модулю скорости первого, составлял с вектором скорости первого угол $\Delta\alpha$, выбираемый случайным образом от 1° до 5° . Объекты наблюдались на дальности $R = 100$ м в пределах ширины круговых ДН $\pm 30^\circ$ (на уровне 0,5 мощности) с разрешением по дальности $\Delta R = 1$ м. Приемники располагались так, чтобы орты векторов направлений на объекты составляли угол, близкий к 85° .

Количество повторений опыта на множестве реализаций случайного шума $p_q(t_i) \sim N(0, \sigma_p^2)$ при отношении сигнал-шум 30 дБ и среднеквадратическом отклонении (СКО) мультипликативного шума $\sigma_\gamma = 10^{-3}$ составляло 5000 реализаций. Шум измерения фазы в каждом канале АР $\varepsilon_q \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$, где СКО $\sigma_\varepsilon = 1 / \sqrt{10^3}$ рассчитывалось в соответствии с [1] как $\sigma_\varepsilon = k / \sqrt{q}$, где $k = 1$; $q = P_0 / N_0$ – отношение мощностей сиг-

нала и шума на входе измерителя, что при отношении сигнал-шум 30 дБ составляет $q = 10^3$.

В таблице показаны оценки среднего значения $M[\rho]$ и СКО $\sigma[\rho]$ случайной величины ρ , имеющей смысл расстояния между моделируемым и найденным объектом в метрах и распределенной по закону Максвелла, а также оценки средней скорости обнаруженного объекта $M[v]$ м/с, $v = |\vec{v}|$, и вероятности D обнаружения всех (двух) объектов. Объект считался обнаруженным, если величина ρ не порешила 1 м.

По результатам моделирования вероятность обнаружения всех объектов за счет предлагаемого подхода повышается с 0,82 до 0,91.

Заключение

Предложен подход к обнаружению подвижных маловысотных источников системой позиционирования нескольких радиоприемников, отличающийся от активных систем позиционирования пониженными в три раза энергетическими затратами за счет использования одной приемопередающей станции и нескольких (двух и более) пассивных приемников и позволяющий обнаруживать одновременно несколько искомого источников сигналов с оценением их пространственных координат и векторов скоростей с повышенным разрешением по доплеровской частоте в каждый текущий момент времени наблюдения.

Задача различения близких векторов в пространстве (соответственно повышения разрешения по доплеровской частоте) решается как задача различения векторов в проекциях на плоскости, образованные линиями визирования приемников. При этом, чем больше приемников (проекционных плоскостей), тем лучше разрешение.

Результаты работы могут найти применение в существующих полуактивных или активных радиотехнических системах пеленгации.

Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
2. Ключко В.К. Пеленгация движущихся объектов многопозиционной доплеровской системой. Радиотехника. 2020. Т. 84, № 11 (21). С. 5-12.
3. Ключко В.К. Алгебраический подход к пеленгации объектов в многопозиционной системе приемников. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 28-33.
4. Ключко В.К., Ву Ба Хунг. Алгоритмы повышения разрешающей способности по доплеровской частоте в системе радиоприемников. Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 3. С. 31-42.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
6. Методы и алгоритмы цифрового спектрального анализа сигналов: учебное пособие / В.И. Кошелев. М.: КУРС, 2021. 144 с.
7. Ключко В.К., Кузнецов В.П., Ву Ба Хунг. Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 12-23.