

УДК 621.371

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ДОПЛЕРОВСКИХ ПРИЕМНИКОВ

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

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

INVESTIGATION OF TIME-FREQUENCY SIGNAL PROCESSING IN A SYSTEM OF DOPPLER RECEIVERS

Klochko V.K., Vu B.H.

The potential possibility of increasing the resolution of reflection signals from several moving sources during signal processing in a semi-active receiver system is investigated. The system consists of a transmitter and several receivers, spatially oriented relative to the transmitter so that the velocity vectors of the moving sources are differently projected on the plane formed by the line of sight of the receivers and the line of sight of the transmitter. The goal of increasing the resolution of the signals is achieved by parallel processing of the received signals in each receiver in the time and frequency domains with the combination of the obtained results. The criterion for increasing the resolution of signals is the probability of detecting all signals. Additionally, the spatial coordinates and velocity vectors of the sources are determined in the receiver system during one observation period. The potential possibility of achieving a high probability of detecting all signals in conditions of synchronized operation of receivers is shown. It is recommended to use the proposed algorithms in systems for detecting several moving sources of different physical nature.

Key words: signal sources, time-frequency processing, receiver positioning system, signal detection, angular coordinate estimates.

Ключевые слова: источники сигналов, частотно-временная обработка, система позиционирования приемников, обнаружение сигналов, оценки угловых координат.

Введение

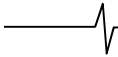
В последнее время при построении систем обработки сигналов в гидроакустике, радиоастрономии и других областях большое внимание уделяют методам разрешения и оценивания параметров нескольких сигналов при совместной частотно-временной обработке. Источниками сигналов являются несколько движущихся объектов, которые отражают волны, индуцируемые передатчиком в радио- или гидроакустических полях. Сигналы принимаются и обрабатываются системой приемников, ориентированных относительно передатчика. Для подвижных источников различие сигналов проявляется как по времени задержки сигналов, так и по частоте [1]. Задачей является обнаружение сигналов путем определения их числа и оценок параметров с целью нахождения параметров самих источников [2] в течение периода наблюдения.

Современные частотно-временные подходы к разрешению нескольких сигналов отличаются от традиционной обработки в частотной области тем, что осуществляют интегральную частотную обработку сигналов в окрестности текущих моментов времени наблюдения, что позволяет проводить частотно-временной анализ источников сигналов. Такой подход способствует разрешению сигналов, но в силу малого временного интервала их обработки разрешающая способность по частоте недостаточна для выделения нескольких сигналов. При этом более

Исследуется потенциальная возможность повышения разрешения сигналов отражения от несколькими движущимися источниками при обработке сигналов в полупассивной системе приемников. Система состоит из передатчика и нескольких приемников, пространственно ориентированных относительно передатчика так, чтобы векторы скорости движущихся источников по-разному проецировались на плоскости, образованные линиями визирования приемников и линией визирования передатчика. Цель повышения разрешения сигналов достигается за счет параллельной обработки принимаемых сигналов в каждом приемнике во временной и частотной областях с объединением полученных результатов. Критерием повышения разрешения сигналов является вероятность обнаружения всех сигналов. Дополнительно в системе приемников определяются пространственные координаты и векторы скорости движения источников за один период наблюдения. Показана потенциальную возможность достижения высокой вероятности обнаружения всех сигналов в условиях синхронизированной работы приемников. Рекомендуется применение предложенных алгоритмов в системах обнаружения нескольких движущихся источников разной физической природы.

эффективным оказывается подход преобразования смеси сигналов, принятых в течение периода наблюдения, в частотную область, где период определяется временем нахождения источников сигналов на заданном промежутке дальности [3, 4].

Известны классические методы разрешения сигналов во временной области, основанные на корреляционной обработке сигналов, однако они также имеют ограниченную разрешающую способность по сравнению с частотной обработкой [5]. Все это стимулирует поиск новых решений в области частотно-временной обработки сигналов [6], более эффективных по разрешению сигналов в сравнении с обработкой в одной частотной области и не требующих заметного увеличения вычислительных затрат.



Дальнейшее повышение разрешения нескольких сигналов потенциально может быть достигнуто при частотно-временной обработке в системе позиционирования нескольких приемников [7], если эти приемники точно синхронизированы с работой передатчика. Многопозиционные системы в настоящее время также активно развиваются и находят применение в различных областях.

Целью работы является исследование потенциальной возможности повышения разрешения сигналов отражения от несколькими движущимися источниками по критерию вероятности обнаружения всех сигналов при их обработке в полуактивной системе приемников.

Модель сигнала

Положение каждого источника сигнала $M(R, \theta, \varphi)$ в антенной системе координат приемника 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, а. Прямоугольные и сферические координаты связаны:

$$x = R \sin \theta \cos \varphi, y = R \sin \theta \sin \varphi, z = R \cos \theta.$$

Передатчик 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. Такой режим обеспечивает малые энергетические затраты и дает возможность использования малогабаритных мобильных станций. Прием сигналов осуществляется пятиканальной антенной решеткой (АР), элементы которой расположены в плоскости несимметрично (для учета неоднозначности измерения фазы), как показано на рис. 1, б.

Для одного приемника сигналы после дискретизации по времени в тракте первичной обработки имеют вид [6]:

$$y_q(t_i) = \sum_{k=1}^m s_{qk}(t_i - \tau_{qk}) + p_q(t_i) = \sum_{k=1}^m A_k \cos(\omega_k t_i - 4\pi R_k / \lambda - 2\pi \delta_{qk} / \lambda + \xi_k + \varepsilon_q) + p_q(t_i),$$

где A_k – амплитуда принимаемого сигнала от k -го источника; ω_k – доплеровская частота от k -го источника; R_k – дальность до k -го источника; λ – длина волны; δ_{qk} – отклонение фронта волны, отраженной от k -го

источника и достигшей q -го элемента АР, относительно центра антенны ($\delta_{0k} = 0$); $\xi_k = \varphi_0 + \eta_k$; φ_0 – начальная фаза; η_k – случайное изменение фазы на $[-\pi, \pi]$; ε_q – фазовый шум в q -м канале; $p_q(t_i)$ – аддитивный шум с нулевым средним, действующий в каждом q -м канале; $q = \overline{1, Q}$, Q – число приемных элементов АР; m – известное количество источников; $i = \overline{1, n}$, n – объем выборки на периоде наблюдения сигналов.

Величина δ_{qk} содержит искомые параметры сигнала, несущие информацию о параметрах k -го источника в виде угловых координат φ_k и θ_k (x_q, y_q – координаты центра q -го элемента АР):

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

Для системы позиционирования приемников модель принимаемого сигнала в j -м приемнике ($j = \overline{1, N}$, N – число приемников) в дискретные моменты времени t_i имеет вид

$$y_{jq}(t_i) = \sum_{k=1}^m s_{jqk}(t_i - \tau_{jqk}) + p_{jq}(t_i) = \sum_{k=1}^m A_{jk} \cos(\omega_{jk} t_i - 2\pi(R_{1k} + R_{jk}) / \lambda - 2\pi \delta_{jqk} / \lambda + \xi_{jk} + j_q) + \varepsilon_{jq}(t_i).$$

Прототип для исследования

В качестве прототипа для исследования взят способ обработки сигналов в частотной области. Данный способ основан на выделении спектральных составляющих в спектре частот нескольких пространственных каналов, измерении фаз спектральных составляющих и оценивании угловых координат методом разности фаз. Алгоритмически способ-прототип представлен на рис. 2.

Преимущество способа-прототипа, основанного на быстром преобразовании Фурье (БПФ), по сравнению с известными методами частотно-временной обработки показано на рис. 3 на примере разрешения по частоте трех сигналов в одинаковых условиях моделирования (время дано в номерах отсчетов, частота – в преобразовании Фурье в Гц).

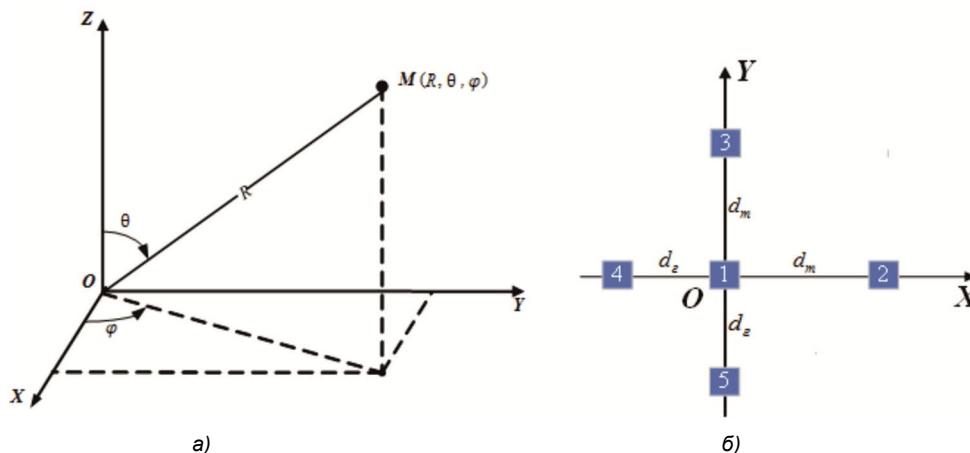


Рис. 1. Система координат (а) и расположение элементов АР (б)

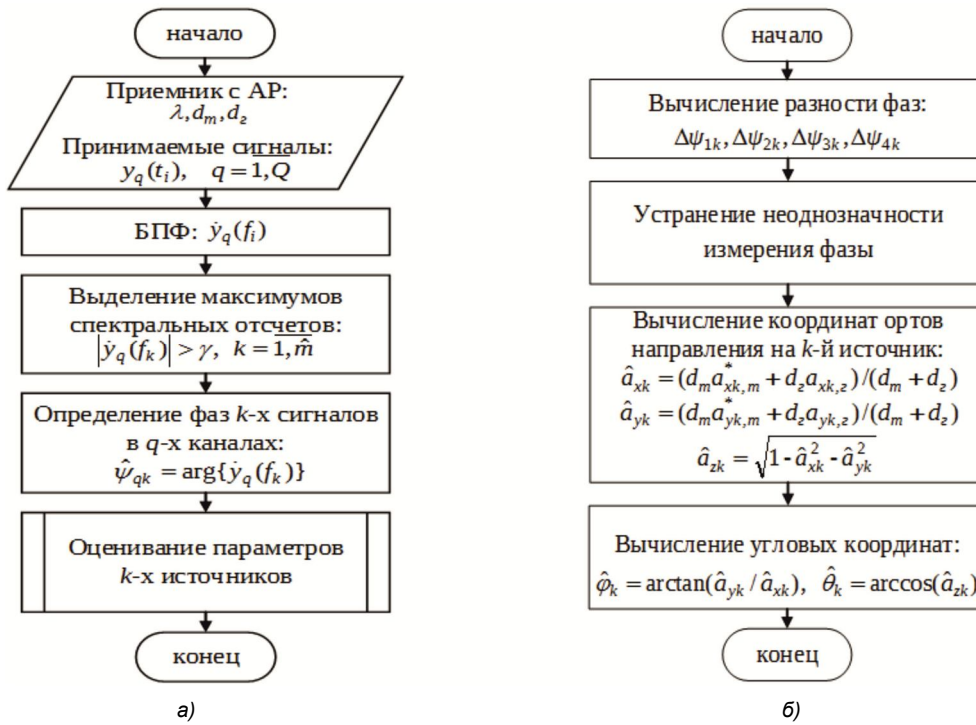


Рис. 2. Обработка в частотной области (а) и оценивание параметров k -го источника (б)

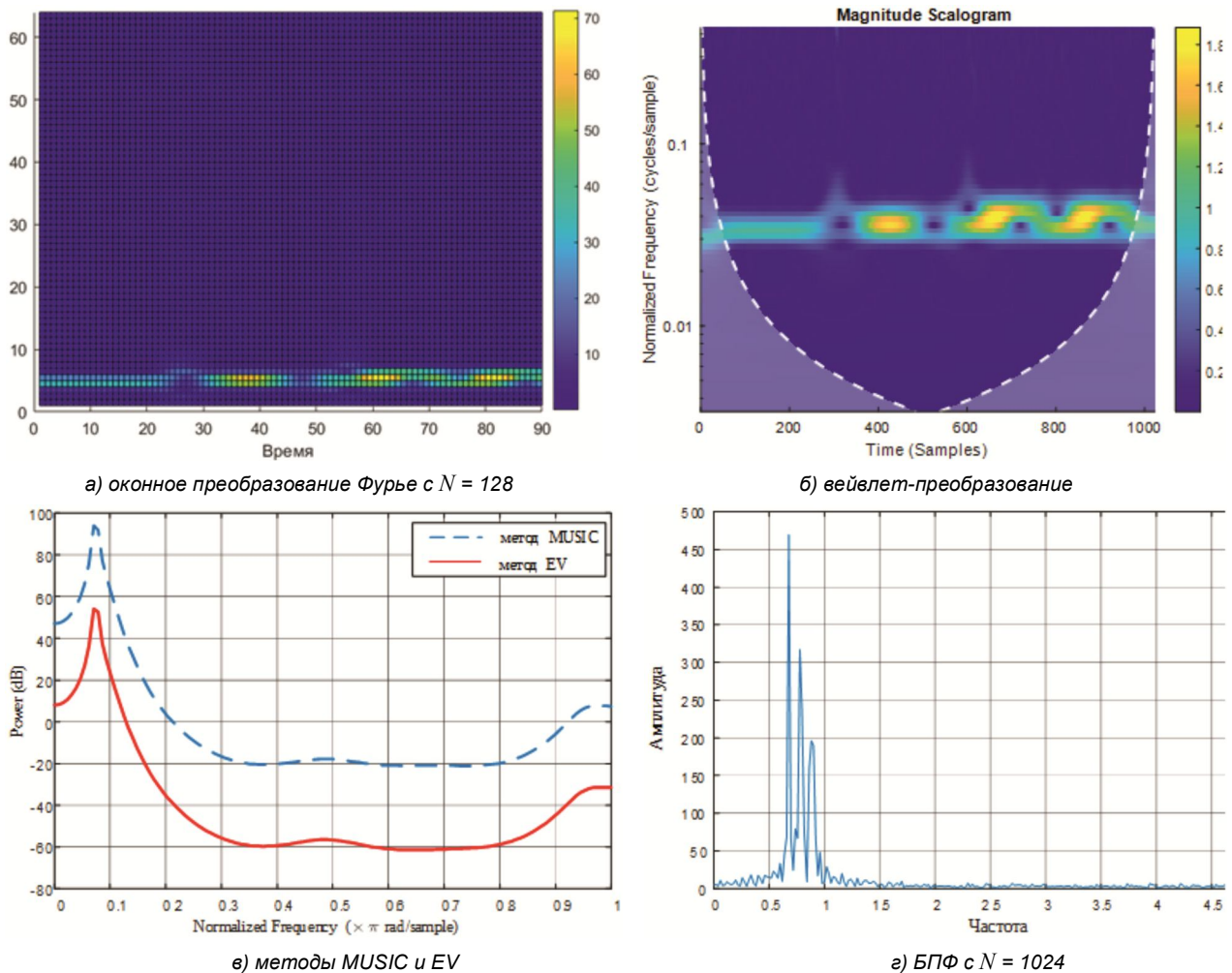


Рис. 3. Сравнение способа-прототипа с известными методами

Улучшение прототипа

Для исследования возможности добиться лучших результатов, чем в частотной области, был разработан способ [6] обработки сигналов во временной области. В соответствии с данным способом принимается смесь сигналов, формируется последовательность временных отсчетов сигналов, подвергаются элементы последовательности операциям фильтрации и обнаруживаются моменты времени τ_k появления k -х сигналов ($k = 1, 2, \dots, \hat{m}$, где \hat{m} – оценка числа сигналов), затем на каждом k -м образованном промежутке времени $[\tau_k, \tau_{k+1})$ оцениваются частота и фаза сигнала, причем сигнал выделяется с помощью вычитания из сглаженного суммарного сигнала экстраполированных оценок сигналов, выделенных ранее. Параметры сигналов и их источников определяются методом разности фаз.

Для оценивания фаз нескольких сигналов использовался фильтр Калмана, настроенный на гармоническую модель сигнала с параметрами a , b и ω [3, 4]. Работа

фильтра сравнивалась с оптимальным измерителем фазы по критерию максимального правдоподобия [1, 7]. Однако оптимальный измеритель рассчитан на один сигнал и для условий рассматриваемой задачи не применим.

Для соединения преимуществ обработки сигналов во временной и частотной областях был разработан способ совместной обработки в частотно-временной области [7]. Обработка во временной и частотной областях ведется параллельно, результаты обработки объединяются, и выдаются оценки числа сигналов и их параметров. Алгоритмически способ представлен на рис. 4.

Исследование для одного приемника

На рис. 5 показаны результаты компьютерного моделирования трех алгоритмов: алгоритма обработки сигналов в частотной области, во временной области и в частотно-временной области. Моделирование проводилось в следующих условиях. Принимался непрерывный сигнал в сантиметровом диапазоне длин волн в

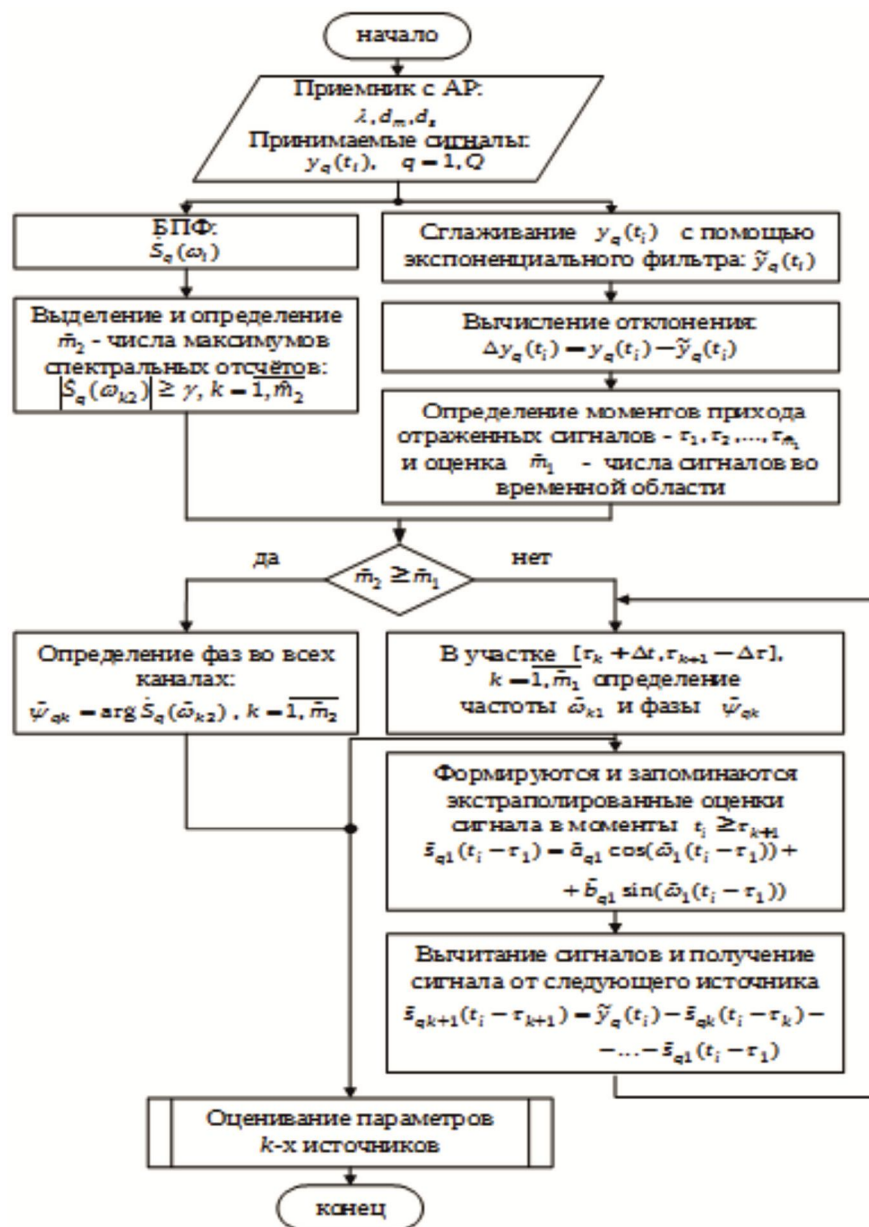


Рис. 4. Совместная обработка в частотно-временной области

одном приемнике. Наблюдение за источниками осуществлялось в пределах круговой диаграммы направленности (ДН) в 2^0 на уровне 0,5 мощности. Параметры АР выбирались как $d_m = 3\lambda$, $d_z = 0,5\lambda$ при $\lambda = 0,03$ м. Фазовый шум действовал в каждом q-м канале по равномерному закону на $[0, \pi/10]$.

Источники двигались с близкими скоростями от 10 до 15 м/с в направлении приемника, первоначально удаленного от них на 1 км по радиальной дальности, и занимали по отношению к нему положения по двум угловым координатам от 29^0 до 31^0 . Сигналы от источников приходили с разной задержкой по времени и моделировалось преимущественно плохое разрешение по доплеровской частоте. Принималось, что условие физической реализуемости способа соответствует скорости распространения волны, характерной для гидролокации.

Для оценки разрешения нескольких сигналов находилась оценка вероятности правильного обнаружения всех сигналов, понимаемая как доверительная вероятность попадания оценок параметров всех m источников сигналов в интервалы, определенные потенциальной точностью фазового метода: ошибки измерения угловой координаты азимута и угла места каждого источника не превышали 1^0 .

Результаты моделирования в сравнительной оценке показывают возможность повышения вероятности правильного обнаружения всех сигналов с 0,63 до 0,87 при $m = 3$ на уровне отношения сигнал/шум $\mathcal{Q} = 14 - 20$ дБ за счет совместной частотно-временной обработки сигналов в условиях одной приемопередающей станции. Положительный эффект разрешения сигналов достигается тем, что сигналы приходят или с разной задержкой времени, или с разным сдвигом по доплеровской частоте, следовательно, они обнаруживаются или по времени, или по частоте. Повышение вероятности с 0,63 до 0,87 согласуется с вероятностной логикой появления хотя бы одного из двух независимых событий.

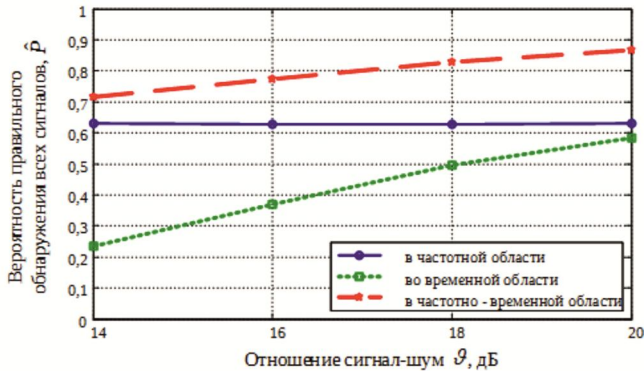


Рис. 5. Зависимости вероятности правильного обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум при $m = 3$ в одном приемнике

Исследование в системе приемников

Для исследования потенциальной возможности разрешения нескольких сигналов были разработаны подход и алгоритм обнаружения сигналов при частотно-временной обработке сигналов в многопозиционной полуактивной системе приемников. Система N приемников состоит из одной приемопередающей станции и $N - 1$

вспомогательных приемников.

Условия применимости алгоритма при моделировании:

- 1) источники находятся в сегменте сферы при условии, что угол между линиями визирования приемников заранее определен $\alpha = 140 - 145^0$;
- 2) наличие источников в сегменте сферы установлено;
- 3) в системе позиционирования ошибки синхронизации при приеме сигналов малы.

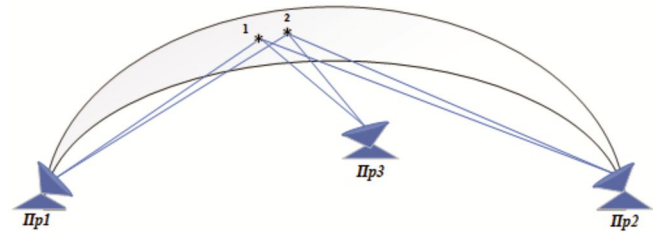


Рис. 6. Система приемников

В приемниках обрабатываются принятые сигналы, некоторые из них принадлежат посторонним источникам, находящимся вне зоны видимости передатчика. На основе оценок параметров сигналов находятся орты направляющих векторов на источники. Алгоритм определяет правильные комбинации ортов – их направления на один и тот же источник (сопряжения). Критерий правильного сопряжения векторов основан на следующем. 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. Устанавливается парная связь между первым и j -ми векторами ($j = 2, N$) в единой прямоугольной системе координат OXYZ в матричной форме:

$$r_1 \mathbf{a}'_1 = (\mathbf{b}_j - \mathbf{b}_1) + r_j \mathbf{a}'_j + \mathbf{e}_{1j},$$

где $r_1 = R_1$, $\mathbf{a}'_j = \mathbf{H}_j \mathbf{a}_j$, $j = 1, N$, R_1 – дальность до первого обнаруженного источника со стороны 1-го приемника; \mathbf{H}_j – 3×3 -матрицы поворота осей j -й антенной системы координат по отношению к общей системе; \mathbf{a}_j – 3×1 -вектор-столбцы координат ортов; \mathbf{b}_j – базовые векторы, соединяющие центр единой системы с центрами антенных систем координат; \mathbf{e}_{1j} – 3×1 -вектор-столбцы ошибок сопряжения указанных пар векторов.

Критерием сопряжения $N - 1$ пар векторов \mathbf{a}'_1 и \mathbf{a}'_j , $j = 2, N$, является ограничение по заданному порогу J_{\max} показателя сопряжения J в виде суммы квадратов норм ошибок сопряжения в каждом варианте перебора соединения векторов:

$$J = \sum_{j=2}^N \|\mathbf{e}_{1j}\|^2 = \sum_{j=2}^N (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j)^T \times \\ \times (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j) \leq J_{\max},$$

где $\Delta \mathbf{b}_{12} = \mathbf{b}_2 - \mathbf{b}_1$; $\Delta \mathbf{b}_{13} = \mathbf{b}_3 - \mathbf{b}_1$ при $N = 3$.

Из необходимого условия существования экстремума J

$$dJ / dr_j = 0 \Rightarrow 2(r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j} - r_j \mathbf{a}'_j)^T (-\mathbf{a}'_j) = 0,$$

с учетом $\mathbf{a}_j^T \mathbf{a}_j = 1$ находятся оценки дальностей:

Таблица. Результаты моделирования в системе приемников

Отношение сигнал-шум	Оценка угловых координат источников (в градусах)		Оценка координат вектора скорости (м/с)	Вероятность правильного обнаружения всех сигналов
ϑ (дБ)	$M[\rho]$	$\sigma[\rho]$	$\sigma[\hat{v}_{x,y,z}]$	\hat{P}
14	0,317	0,132	0,211	0,907
16	0,315	0,129	0,202	0,930
18	0,314	0,121	0,197	0,947
20	0,310	0,118	0,195	0,963

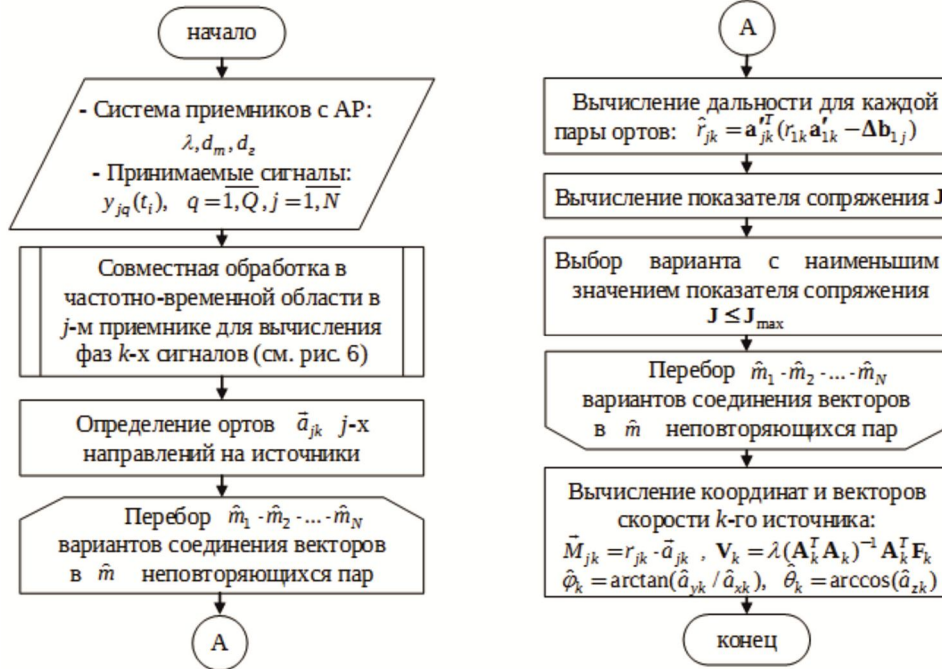


Рис. 7. Алгоритм обработки сигналов в системе N приемников

$$\hat{r}_j = \mathbf{a}'_j^T (r_1 \mathbf{a}'_1 - \Delta \mathbf{b}_{1j}), \quad j = \overline{2, N},$$

которые при подстановке в выражение показателя J обеспечивают проверку критерия сопряжения при классификации векторов. Невыполнение неравенства ($J > J_{\max}$) приводит к отсеиванию ложных вариантов сопряжения.

Прошедшие через порог ($J \leq J_{\max}$) варианты сопряжения векторов позволяют определить динамические свойства источников в течение периода наблюдения и обработки сигналов. Система уравнений в матричной форме для $N=3$ содержит координаты направляющих векторов a_x, a_y, a_z , сдвиги частот f_1, f_2, f_3 сигнала от одного и того же источника, обнаруженного в трех приемниках, и координаты вектора скорости источника v_x, v_y, v_z :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{V} = \lambda \mathbf{F} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2a'_{1x} & 2a'_{1y} & 2a'_{1z} \\ a'_{1x} + a'_{2x} & a'_{1y} + a'_{2y} & a'_{1z} + a'_{2z} \\ a'_{1x} + a'_{3x} & a'_{1y} + a'_{3y} & a'_{1z} + a'_{3z} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}.$$

Методом обратной матрицы находится оценка вектора скорости источника:

$$\hat{\mathbf{V}} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}.$$

В общем случае $N > 3$ приемников: $\hat{\mathbf{V}} =$

$$= \lambda (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}.$$

Принцип различения сигналов с близкими сдвигами частот в системе приемников заключается в положении линий визирования приемников в направлении источников так, чтобы в одной из плоскостей, образованных линиями визирования $N-1$ пар приемников, разность проекций векторов скоростей была наибольшей.

СКО $\sigma[\hat{v}_{x,y,z}]$ отдельной координаты несмещенной оценки вектора скорости $\hat{\mathbf{V}} = (\hat{v}_x, \hat{v}_y, \hat{v}_z)^T$ аналитически можно оценить по формуле (Tr – след матрицы)

$$\sigma[\hat{v}_{x,y,z}] = \lambda \sigma_f \sqrt{Tr(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} / 3.$$

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 7. Результаты моделирования алгоритма показаны на рис. 8. В таблице представлены результаты, полученные для трех сигналов ($m=3$) 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 сигналов, СКО оценок координат вектора скорости $\sigma[\hat{v}_{x,y,z}]$, а также оценки вероятности \hat{P} правильного обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум (аддитивный шум p_q) в системе $N=3$.

Результаты моделирования показывают потенциальную возможность повышения вероятности обнару-

жения всех сигналов с 0,87 до 0,96 (по результатам моделирования трех сигналов) за счет реализации частотно-временной обработки в системе $N = 3$ (две пары приемников: первый-второй и первый-третий) по сравнению с частотно-временной обработкой в одной приемопередающей станции, а также определить параметры и динамические свойства источников. Повышение вероятности с 0,87 до 0,96 также согласуется с вероятностной логикой появления хотя бы одного из двух независимых событий.

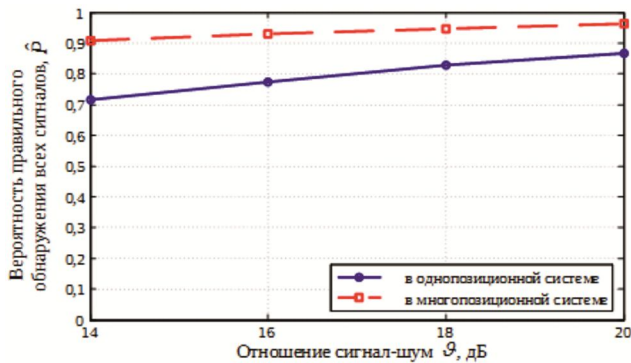


Рис. 8. Зависимости вероятности правильного обнаружения всех сигналов от отношения сигнал-шум при частотно-временной обработке (три сигнала) в системе $N = 3$

Заключение

Проведено исследование возможности повышения разрешения нескольких сигналов отражения от несколькими движущимися источниками при обработке сигналов в полуактивной системе приемников. Предложен подход к решению задачи обнаружения всех сигналов за счет частотно-временной обработки сигналов в системе приемников и алгоритм его реализации. По результатам моделирования алгоритма показано, что потенциально (без учета ошибок синхронизации приемников) можно повысить вероятность обнаружения всех сигналов с 0,87 до 0,96 (по результатам моделирования трех сигналов) за счет частотно-временной обработки в системе одной

приемопередающей станции и двух вспомогательных приемников по сравнению с частотно-временной обработкой в одной приемопередающей станции, а также определить параметры и динамические свойства источников (векторы скорости) в одном периоде обработки сигналов.

Предложенные алгоритмы могут найти применение в системах обнаружения сигналов от нескольких движущихся источников разной физической природы. Перспектива исследований направлена на учет ошибок синхронизации работы приемников.

Литература

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
2. Ключко В.К., Кузнецов В.П., Ву Ба Хунг. Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. Вып. 80. С. 12-23.
3. Кузнецов В.П., Чураков Е.П. Система фильтров Калмана для оценки параметров отраженного сигнала. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 1 (Вып. 51). С. 9-14.
4. Ключко В.К., Кузнецов В.П., Левитин А.В. и др. Алгоритмы определения координат движущихся целей на базе многоканальной доплеровской РЛС. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 3 (Вып. 53). С. 3-10.
5. Методы и алгоритмы цифрового спектрального анализа сигналов: учебное пособие / В. И. Кошелев. М.: КУРС, 2021. 144 с.
6. Ключко В.К., Ву Б. Х. Частотно-временная обработка сигналов в доплеровском радиоприемнике. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 15-21.
7. Ключко В.К., Ву Ба Хунг. Обнаружение подвижных источников системой радиоприемников. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 50-55.

НОВЫЕ КНИГИ

Витязев В.В., Волченков В.А., Овинников А.А., Лихобабин Е.А.

Цифровая обработка сигналов: Учебное издание для вузов, М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 188 с.: ил.

Рекомендовано Научно-методическим советом ФГБОУ ВО «Рязанский государственный Радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» в качестве учебного пособия для студентов обучающихся по программе высшего образования по направлениям 11.03.01 – «Радиотехника» и 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», магистров по 09.04.04 – «Программная инженерия» и специалистов по специальности 12.05.01 – «Электронные и оптоэлектронные приборы и системы специального назначения».

Изложены общие принципы цифровой обработки сигналов. Основное внимание уделено проектированию цифровых фильтров в классе КИХ- и БИХ-цепей. Приводятся теоретические сведения, касающиеся характеристик фильтров, приводятся подробные примеры их проектирования и анализа их характеристик. Рассматриваются инструменты моделирования прохождения сигналов через цифровые фильтры в среде SimInTech. Использование среды SimInTech для проектирования

цифровых фильтров и моделирования прохождения сигналов через них отличает данное учебное издание от имеющейся учебной литературы в данной области.

Для студентов, обучающихся по направлениям 11.03.01 – «Радиотехника» и 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и специальности 12.05.01 – «Электронные и оптоэлектронные приборы и системы специального назначения», и магистрантов, обучающихся по направлению 09.04.04 – «Программная инженерия», может представлять интерес для специалистов.

