

УДК 621.396. 96

СПОСОБ ПАССИВНОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ УГЛОМЕРНО-РАЗНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКОЙ ЛОКАЦИИ, СТРУКТУРА И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ЕГО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. Л. Джигоев, И. С. Омельчук, Д. А. Тюрин, Г. Г. Фоминченко, Г. Л. Фоминченко

«Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи»,

Федеральный научно-производственный центр,

344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, д. 130

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2017 г.

Аннотация. Обоснованы операции способа пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской локации, обеспечивающего измерение координат и траекторий движения радиоизлучающих объектов, оснащенных радиопередающими устройствами модулированных сигналов с фазовой, частотно-фазовой и/или квадратурной амплитудной модуляцией различной кратности, для случая их равномерного, прямолинейного перемещения на постоянной высоте. В начале, основываясь на измерениях через равноотстоящие интервалы времени угловых координат и восстановленной несущей частоты модулированных сигналов, определяются значения курсовых углов- направления движения объектов, затем, используя зависимость величины доплеровского приращения несущей частоты от направления движения, вычисляются модуль вектора скорости объекта, путь пройденный им за фиксированное время и местоположение объектов как точки пересечения линий положения – лучей проведенных из начала координат под соответствующими азимутальными углами и окружности, проходящей через начало координат, хордой которой является вышеуказанный отрезок пути. В последующих разделах в соответствии с операциями инверсно-кинематического угломерно-разностного-доплеровского способа синтезирована структура пассивной однопозиционной радиолокационной станции, включающей две группы устройств:

- каналы наблюдения с устройствами первичной обработки;
- многопроцессорное устройство вторичной обработки.

Также проведена оценка точностных характеристик системы, подтвердившая возможность её использования для измерения дальности, скорости и направления движения объектов.

Ключевые слова: пассивная однопозиционная угломерно-разностно-доплеровская локация, радиолокационная система, радиоизлучающий объект.

Abstract. The operations of the method of passive one-position angular-difference-Doppler location providing a measurement of the coordinates and trajectories of the motion of radio-emitting objects equipped with radio transmitting devices of modulated signals with phase, frequency-phase and/or quadrature amplitude modulation of various multiplicity are justified for the case of their uniform, rectilinear displacement on a constant height. First, the values of the heading angles of the direction of motion of objects are determined on the base of measurements at equidistant intervals of time of the angular coordinates and the reconstructed carrier frequency of the modulated signals. Then, the magnitude of the velocity vector of the object, the path traversed in a fixed time and epy location of objects as points of intersection of position lines - rays drawn from the origin to the corresponding azimuth angles and a circle passing through the origin of coordinates, the chord of which is the above-mentioned segment of the path, are calculated using the dependence of the magnitude of the Doppler carrier frequency increment on the direction of motion. In the following sections, in accordance with the operations of the inverse-kinematic angular-difference-Doppler method, the structure of a passive single-position radar station including two groups of devices is synthesized:

- observation channels with devices for primary processing;
- multi-processor secondary processing device.

Also, an estimation of the accuracy characteristics of the system was made, which confirmed the possibility of its use for measuring the range, speed and direction of movement of objects.

Key words: passive one-position angular-difference-Doppler location, radar system, radio-emitting object.

Введение

Современные подвижные объекты различного назначения (корабли, самолёты, беспилотные летательные аппараты и др.) оснащаются радиопередающими устройствами для обмена информацией с пунктами управления и между собой. Эти радиопередающие устройства функционируют в диапазонах частот от 0,1 до 50 ГГц и используют модулированные сигналы с фазовой, частотно-фазовой и/или квадратурной амплитудной модуляцией различной кратности. Наличие таких сигналов позволяет методами пассивной радиолокации [1,2] осуществить обнаружение перемещающихся в пространстве радиоизлучающих объектов (РИО) – носителей упомянутых радиопередающих устройств, определить их угловые координаты (УК), а также отследить их изменения.

Определение траекторий движения РИО обычно осуществляется системами активной радиолокации путём измерения дальности РИО¹ и его угловых координат. В системах пассивной радиолокации эти задачи решаются с помощью многопозиционных систем, состоящих как минимум из двух приёмных станций, разнесённых в пространстве на точно известное расстояние (базу системы) и объединённых с помощью ретрансляторов данных в единое целое [3]. При установке пассивной радиолокационной системы (РЛС) на подвижном носителе измерение координат осуществляется кинематическими методами [4]. Однако при использовании многопозиционных систем существенно возрастает объём используемой аппаратуры, в том числе за счёт добавления устройств трансляции данных, её сложность и стоимость. Поэтому поиск способов пассивного однопозиционного определения координат и траекторий РИО, а также алгоритмов функционирования пассивных однопозиционных РЛС, их реализующих, является актуальной задачей.

Ц е л ь р а б о т ы – обоснование операций способа, обеспечивающего пассивное однопозиционное определение координат и траекторий движения радиоизлучающих объектов по результатам измерений параметров излучаемых

¹ За счёт измерения времени запаздывания отражённых сигналов относительно момента их излучения.

ими сигналов, синтез структуры и алгоритма функционирования пассивной однопозиционной радиолокационной системы.

Р е ш а е м ы е з а д а ч и.

1. Выбор операций способа пассивной однопозиционной локации, позволяющего обеспечить определение координат, скоростей, направлений и траекторий движения радиоизлучающих объектов.

2. Синтез структуры и алгоритма функционирования пассивной однопозиционной РЛС, реализующей предложенный способ локации.

3. Оценка точностных характеристик пассивной однопозиционной радиолокационной системы.

1. Выбор операций, определяющих способ пассивного однопозиционного измерения координат, скоростей, направлений и траекторий радиоизлучающих объектов

Движение РИО на рассматриваемом участке траектории (точки A_1, A_2, \dots, A_k на рис. 1) считаем равномерным, прямолинейным² и происходящем на постоянной высоте H над поверхностью земли, которая считается плоской.

Положение РИО в пространстве и его траектория движения определяются текущими значениями:

– модуля $D_{тек}$ вектора наклонной дальности $\mathbf{D}_{тек}$ и модуля $d_{тек}$ вектора горизонтальной дальности $\mathbf{d}_{тек}$, являющегося проекцией вектора $\mathbf{D}_{тек}$ на горизонтальную плоскость³;

– азимута $\beta_{тек}$, отсчитываемого против часовой стрелки (вид сверху) от основного направления, совпадающего с положительным направлением оси Ox , до направления вектора горизонтальной дальности $\mathbf{d}_{тек}$;

– угла места $\varepsilon_{тек}$, отсчитываемого от вектора горизонтальной дальности до вектора наклонной дальности, модули которых связаны соотношением $d_{тек} = D_{тек} \cos \varepsilon_{тек}$;

– абсолютной величины V вектора скорости \mathbf{V} ;

² Если объект движется по криволинейной траектории, то осуществляется её кусочно-линейная аппроксимация.

³ Проекция на горизонтальную плоскость далее кратко называется «горизонтальная проекция».

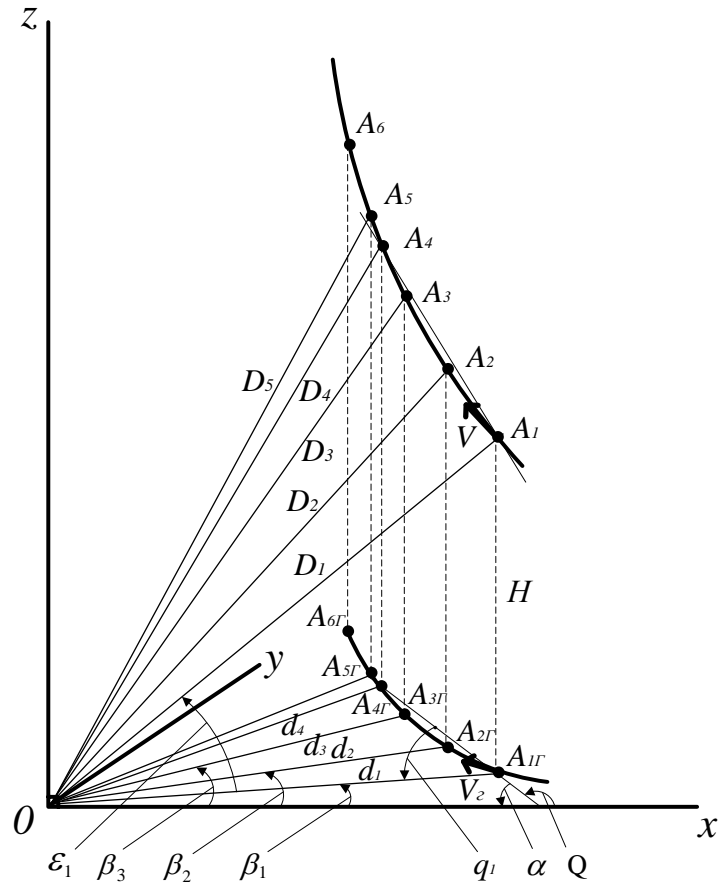


Рис. 1. Геометрия задачи (кривыми показаны траектория объекта и её проекция на плоскость xOy).

- путевого угла Q , отсчитываемого на горизонтальной плоскости против часовой стрелки от основного направления до проекции вектора скорости V ;
- курсового угла $q_{тек}$, отсчитываемого против часовой стрелки от горизонтальной проекции вектора скорости до вектора горизонтальной дальности, направление которого задаётся значением азимута $\beta_{тек}$ объекта.

Для принятой гипотезы движения объекта радиальная составляющая скорости изменения горизонтальной дальности $V_{r_2} = V_r \cos \varepsilon = V \cos q$, причём эта величина имеет знак («+» соответствует приближению к РЛС). Из последнего выражения следует, что зависимость скорости изменения наклонной дальности V_r от курсового угла q на горизонтальной плоскости определяется формулой

$$V_r = V \frac{\cos q}{\cos \varepsilon}.$$

Учитывая вышеизложенные положения, дальнейшее рассмотрение взаимодействия РИО и пассивной однопозиционной РЛС будем производить на горизонтальной плоскости (рис. 2), используя следующие параметры движения: азимут β_{mek} , горизонтальную дальность d_{mek} , курсовой угол q_{mek} , скорость V и радиальную скорость (скорость изменения горизонтальной дальности) $V_{r2} = V \cos q_{mek}$.

Пусть установленное на борту РИО передающее устройство излучает в процессе движения модулированный узкополосный ($\Delta f_c / f_0 \ll 1$) сигнал

$$s[t, x(t)] = S(t) \cos \psi(t),$$

где $S(t)$ – огибающая сигнала;

f_0 – несущая частота излучаемого сигнала;

Δf_c – ширина спектра излучаемого сигнала;

$S(t)$ – огибающая сигнала;

$\psi(t)$ – фаза сигнала;

$x(t)$ – векторный случайный процесс, характеризующий изменение координат РИО, которые необходимо оценить.

Пассивная РЛС принимает на временном интервале $t_1 - t_k$, где $k = \overline{1, K}$, смесь сигнала $s_k [t_k, x(t_k)]$ и стационарного гауссовского шума $n(t)$ в виде

$$\xi_k(t_k) = s_k [t_k, x(t_k)] + n(t_k), \quad (1)$$

где $s_k [t_k, x(t_k)] = A(t_k) \cos [2\pi f_H(t_k) + \varphi(t_k) + \varphi_0]$;

$A(t_k)$ – амплитуда принимаемого сигнала;

$f_H(t_k) = f_0 + f_d(t_k) = f_0 \left[1 + \frac{V \cos q_{mek}(t_k)}{c \cos \varepsilon_{mek}(t_k)} \right]$ – несущая частота принимаемого

сигнала;

$f_d(t_k)$ – доплеровское приращение частоты;

$\varphi(t_k)$ – функция, описывающая закон фазовой модуляции;

φ_0 – начальная фаза сигнала;

$c = 299792458$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн.

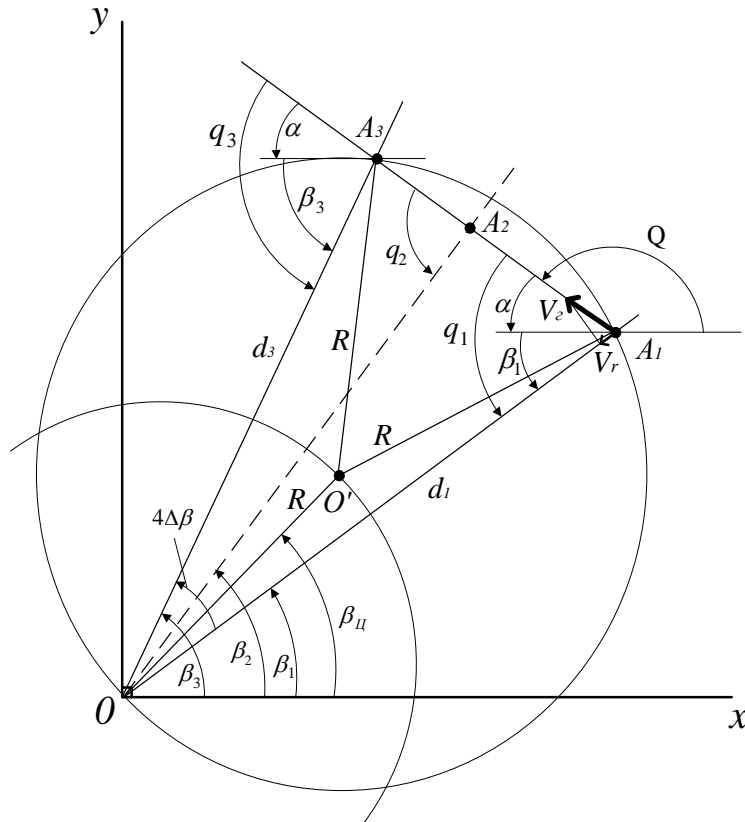


Рис. 2. Геометрия задачи на горизонтальной плоскости.

На первом этапе работы РЛС обеспечиваются:

– обнаружение и измерение (методами спектрального анализа) ширины спектра сигнала Δf_c , средней частоты спектра $f_c \approx f_H$ и вида модуляции сигнала [2, 5-7];

– измерение направления прихода сигнала [8], то есть УК объекта, сопровождение объекта по УК, измерение угловых скоростей его движения [9];

– приём и демодуляция сигнала, в процессе которой выделяется или восстанавливается его несущая частота [10] и измеряются её текущие значения.

Анализ полученных на первом этапе данных показал, что:

– отсчёты УК, взятые через равноотстоящие на интервалы Δt моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k в точках A_1, A_2, \dots, A_k прямолинейной траектории РИО, и значения их приращений $\Delta\beta_{k,1} = \beta_k - \beta_1$, как показано в [11,12], обеспечивают возможность нахождения лишь виртуальной (условной) траектории РИО, движущегося в пространстве равномерно и прямолинейно (или прогнозирование УК объекта, движущегося прямолинейно и равноускоренно), на основе произвольного выбора одной условной траектории из множества возможных;

– взятые в те же моменты времени при нахождении объекта в точках траектории $A_1 - A_k$ отсчёты значений частоты сигнала

$$f_{Hk} = f_0 + \frac{V \cos q_k}{\lambda \cos \varepsilon_k},$$

где λ – длина волны излучения РИО,

зависят от величины скорости V объекта, направления его движения – курсового угла $q_k = q_1 + \Delta\beta_{k,1}$, и от значений приращений азимута $\Delta\beta_{k,1}$, а отношение приращений несущей

$$\begin{aligned} \Delta f_{k,1} = f_{Hk} - f_{H1} &= \frac{V}{\lambda \cos \varepsilon_k} \cos(q_1 + \Delta\beta_{k,1}) - \frac{V}{\lambda \cos \varepsilon_1} \cos q_1 = \\ &= \frac{2V}{\lambda \cos \varepsilon_1} \sin\left(q_1 + \frac{\Delta\beta_{k,1}}{2}\right) \sin \frac{\Delta\beta_{k,1}}{2} \quad \text{при } \cos \varepsilon_k \approx \cos \varepsilon_1, \end{aligned} \quad (2)$$

взятых на интервалах $(k-1)\Delta t$ и Δt при $k=3$, имеющее вид

$$F_{3,2,1} = \frac{\Delta f_{3,1}}{\Delta f_{2,1}} = \frac{\sin\left(q_1 + \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2}\right) \cdot \sin \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2}}{\sin\left(q_1 + \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2}\right) \cdot \sin \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2}}, \quad (3)$$

является уравнением для курсового угла.

Обозначая

$$F_{3,2,1} \frac{\sin \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2}}{\sin \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2}} = p, \quad (4)$$

после преобразований (3) получим

$$\operatorname{ctg} q_1 = \frac{\cos \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2} - p \cos \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2}}{p \sin \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2} - \sin \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2}}, \quad (5)$$

откуда получаем соотношение для курсового угла

$$q_1 = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \frac{\sin \Delta\beta_{3,1} - F_{3,2,1} \sin \Delta\beta_{2,1}}{2 \left(F_{3,2,1} \sin^2 \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2} - \sin^2 \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2} \right)}. \quad (6)$$

Скорость РИО на участке A_1, \dots, A_k при равномерном прямолинейном движении получаем при использовании формулы (2) в виде

$$V = \frac{\Delta f_{k,1} \lambda \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_k}{\cos q_k \cos \varepsilon_1 - \cos q_1 \cos \varepsilon_k} = \frac{2c}{f_k + f_1} \frac{\Delta f_{k,1} \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_k}{\cos q_k \cos \varepsilon_1 - \cos q_1 \cos \varepsilon_k}. \quad (7)$$

Зная скорость движения объекта, можно на временном интервале $\Delta t_{k,1} = (k-1)\Delta t$ определить длину пройденного им пути

$$d_{k,1} = V(k-1)\Delta t. \quad (8)$$

Так как операции рассматриваемого способа реализуются за счёт перемещения РИО относительно пассивного измерителя, то этот способ является инверсно-кинематическим, а величина пути $d_{k,1}$ – псевдобазой. Местоположение объекта может быть определено точками пересечения линий положения – лучей, проведенных из начала координат под углами β_1 и β_k , и окружности, проходящей через начало координат и точки $A_1 - A_k$ траектории, хордой которой является путь $d_{k,1}$. В этом случае центральный угол сектора, опирающегося на хорду $d_{k,1}$, будет $\alpha = 2\Delta\beta_{k,1}$, а радиус окружности определяется как

$$R = \frac{d_{k,1}}{2 \sin 2\Delta\beta_{k,1}}.$$

Центр O' этой окружности находится в точке пересечения вспомогательной окружности радиуса R с центром в начале координат O и луча, проведенного из

точки O под углом $\beta_{II} = \beta_1 + q_1 + \Delta\beta_{k,1} - 90^\circ$.

Дальности до точек A_I, A_k траектории вычисляются по теореме синусов как стороны треугольника $OA_I A_k$

$$d_1 = \frac{d_{k,1} \sin q_k}{\sin \Delta\beta_{k,1}}, \quad (9)$$

$$d_k = \frac{d_{k,1} \sin q_1}{\sin \Delta\beta_{k,1}}. \quad (10)$$

Таким образом, определены операции инверсно-кинематического способа, позволяющего на основе измерений УК объекта и приращений несущей частоты сигналов, излучаемых бортовым передающим устройством РИО, вычислить направление движения (курсовой угол), скорость движения объекта, а также расстояние до него.

Новизна этого способа подтверждена патентом на изобретение [13]; следуя ему, описанную пассивную однопозиционную локацию будем называть угломерно-разностно-доплеровской.

2. Структура и алгоритм функционирования пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской РЛС

Осуществим синтез структуры пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской РЛС, обеспечивающей определение координат и траекторий движения РИО на основе измерения УК объектов и параметров излучаемых им сигналов.

Пассивная РЛС принимает излучаемый бортовым передающим устройством РИО сигнал (1) при его равномерном прямолинейном движении на временном интервале $t_1 - t_k$, где $k = \overline{1, K}$, представляющий собой узкополосный процесс $s_k [t_k, x(t_k)]$. Компоненты вектора $\mathbf{x}(t_k) = [\beta_k(t_k), f_{Hk}(t_k), q_k(t_k), V, d_k(t_k)]^T$, где T обозначает транспонирование, характеризуют характер изменения координат РИО, а их изменения описываются уравнениями, соответствующими обоснованным выше операциям угломерно-разностно-доплеровского способа локации:

$$\dot{\beta}_k = Vd_k^{-1} \sin q_k, \quad \beta(t_1) = \beta_1; \quad (11)$$

$$\dot{q}_k = \dot{\beta}_k, \quad q_k(t_1) = q_1 = \text{arcctg} \frac{\sin \Delta\beta_{3,1} - F_{3,2,1} \sin \Delta\beta_{2,1}}{2 \left(F_{3,2,1} \sin^2 \frac{\Delta\beta_{2,1}}{2} - \sin^2 \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2} \right)} \quad (12)$$

$$\dot{f}_{Hk} = -\frac{V}{c} \sin q_k, \quad f_{H1}(t_k) = f_{H1} = f_0 \left(1 + \frac{V}{c} \cos q_1 \right); \quad (13)$$

$$\dot{V}_k = 0, \quad V_k(t_1) = V = \frac{2c}{f_3 - f_1} \frac{\Delta f_{3,1} \cos \varepsilon_1}{\sin \left(q_1 + \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2} \right) \sin \frac{\Delta\beta_{3,1}}{2}}; \quad (14)$$

$$\dot{d}_k = \frac{V \sin q_1}{\sin \Delta\beta_{k,1}} \left[1 - \frac{d_{k,1}}{d_k} \text{ctg} \Delta\beta_{k,1} \sin q_k \right], \quad d_k(t_1) = d_1 = \frac{2V\Delta t \sin(q_1 + \Delta\beta_{3,1})}{\sin \Delta\beta_{3,1}}. \quad (15)$$

Вектор состояния $\mathbf{x}(t_k)$ в соответствии с [14] удовлетворяет матричному дифференциальному уравнению

$$\dot{\mathbf{x}}(t_k) = \mathbf{F}[t_k, \mathbf{x}(t_k)] + \mathbf{N}_k(t_k), \quad \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1, \quad (16)$$

где $\mathbf{F}[t_k, \mathbf{x}(t_k)]$ – вектор-функция, определяемая соотношениями (11) – (15);

$\mathbf{N}_k(t_k)$ – вектор возмущающих гауссовских шумов с нулевым средним и единичной дисперсией.

Решение уравнений (11-15) методами нелинейной фильтрации [15] осуществляется путём разложения процесса $x_k(t_k)$ в ряд Тейлора с сохранением лишь линейных членов ряда [16]. В результате определяются структура и алгоритм функционирования устройств пространственно-временной обработки принимаемых сигналов, оптимизированные по критерию минимума среднеквадратической ошибки измерения параметров движения объекта.

Так, в работе [4] в пространстве состояний синтезированы структура и алгоритм функционирования устройства определения кинематическим способом координат наземного источника радиоизлучений. Синтезированное устройство представляет собой многоканальную следящую систему, состоящую из многомерного дискриминатора, обеспечивающего получение невязок, корректирующих (после прохождения цепей сглаживания) значения

оценок координат объекта. К аналогичной структуре приводят результаты решения в пространстве состояний уравнения (16) для инверсного кинематического угломерно-разностно-доплеровского способа измерения УК и траекторий движения РИО.

Однако практическая реализация синтезированных многоканальных структур при работе в режиме реального времени наталкивается на трудности, связанные с высокими требованиями к ресурсам вычислителей РЛС, сложностью формирования векторов настройки, необходимостью реализации жёстких требований к точности и стабильности амплитудно-фазовых характеристик многоканальных устройств пространственно-временной обработки принимаемых сигналов. Поэтому при исследовании сложных многосвязных радиотехнических систем применяют декомпозиционный подход [20], производя затем оптимизацию их составных частей и их рекомпозицию.

Используя предложенную в [3] методику, декомпозируем структуру пассивной однопозиционной РЛС, функционирующей в соответствии с изложенным в разделе 1 угломерно-разностно-доплеровским способом, на две группы устройств:

- каналы наблюдения с устройствами первичной обработки, обеспечивающие формирование наблюдаемых компонентов вектора $\mathbf{x}(t_k)$ – угловых координат объектов и несущих частот принимаемых сигналов;
- устройство вторичной обработки (УВО), формирующее компоненты вектора $\mathbf{x}(t_k)$, которые участвуют в расчёте параметров движения РИО.

Каналы наблюдения выполняют:

- обнаружение и измерение параметров сигналов РИО в условиях априорной неопределённости их значений;
- измерение и фильтрацию значений УК объектов;
- восстановление несущих частот сигналов и фильтрацию их значений.

На входы каналов наблюдения поступают сигналы с выходов антенной системы после обработки входных волновых полей. Если приём сигналов осуществляется в условиях априорной неопределённости относительно их

параметров, структура обнаружителя – измерителя ширины спектра Δf_c , средней частоты спектра f_c узкополосного сигнала с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги может быть определена [5] в виде устройства, обеспечивающего сравнение с порогом отсчётов усреднённой периодограммы, результат которого является оценкой максимального правдоподобия значения измеряемого параметра.

Оценка вида модуляции принимаемого узкополосного сигнала может быть получена в устройстве, реализующем нейросетевой метод [7], основанный на использовании для решения задачи величин кумулянтов второго и четвёртого порядков, которые вычисляются по значениям зарегистрированных отсчётов сигнала.

Структура каналов измерения и фильтрации значений азимута и угла места синтезирована в [8] методом нелинейной фильтрации. В состав каждого из них, в совокупности образуя угловые дискриминаторы, входят:

- угловой датчик на базе зеркальной антенны или антенной решётки,
- устройство выделения сигналов углового рассогласования вида [17] при использовании моноимпульсного метода или вида [18] при использовании метода двухканального сканирования с компенсацией,

а также сглаживающие оптимальные фильтры [3], функционирующие в соответствии с алгоритмом Калмана и формирующие оценки $\bar{\beta}(t)$, $\bar{\varepsilon}(t)$, необходимые для перестройки угловых дискриминаторов.

Коэффициенты преобразования фильтров определяются программным регулятором, сигналы управления которым вырабатываются блоком точности, представляющим собой [18] коррелятор совпадения полярности, выходное напряжение которого пропорционально отношению сигнал/шум на входе антенной системы РЛС.

Структура устройства восстановления несущей частоты узкополосных сигналов для случая приёма сигналов с фазовой или квадратурной амплитудной модуляцией синтезирована в [19] методом нелинейной оптимальной

фильтрации при гауссовской аппроксимации апостериорной плотности распределения вероятности фильтруемого процесса.

Полученная структура – схема Костаса, является оптимальной по критерию максимума апостериорной вероятности и содержит управляемый генератор, синхронный детектор и фильтр низкой частоты, образующие схему фазовой автоподстройки частоты генератора с обратной связью по решению.

Отсчёты сглаженных значений угловых координат объекта $\bar{\beta}(t_k)$, $\bar{\varepsilon}(t_k)$ и несущей частоты принимаемого сигнала поступают с выходов каналов наблюдения на входы УВО, которое методом прямого решения вырабатывает, в соответствии с операциями угломерно-разностно-доплеровского способа по отсчётам наблюдаемых компонент вектора состояния $x(t_k)$, текущие оценки координат объекта.

УВО содержит центральный процессор расчёта траекторий объектов, обеспечивающий также управление его работой, запоминающие устройства, интерфейсы связи с каналами наблюдения и процессорами вычисления курсовых углов, скоростей равномерного и прямолинейного движения, горизонтальных и наклонных дальностей между пассивной РЛС и РИО. Для определения сглаженного значения курсового угла объекта производится расчёт значения оценки $\text{ctg } q_1$ по формуле (4) с использованием отсчётов $\beta_k(t_k)$, $\varepsilon_k(t_k)$, $f_{Hk}(t_k)$, соответствующих положениям РИО в точках $A_1 - A_3$ (рис.2). Затем, по мере поступления отсчётов параметров при $k = \overline{1, K}$, осуществляется расчёт q_1^k по рекуррентной формуле

$$\text{ctg } q_1^k = \frac{\sin \Delta\beta_{k,1} - F_{k, \frac{k+1}{2}, 1} \sin \Delta\beta_{\frac{k+1}{2}, 1}}{2 \left(F_{k, \frac{k+1}{2}, 1} \sin^2 \Delta\beta_{\frac{k+1}{2}, 1} - \sin^2 \Delta\beta_{k,1} \right)}, \quad (17)$$

выполняется статистическая обработка результатов расчётов, определяется среднее значение $\overline{\text{ctg } q_1}$ и дисперсия $\sigma_{q_1}^2$, а после функционального преобразования $\overline{\text{ctg } q_1} \rightarrow \overline{q_1}$ – расчёт текущего значения курсового угла

$$q_{k \text{ мек}} = \bar{q}_1 + \Delta\beta_{k,1}.$$

Значения отсчётов модуля скорости V объекта в отдельном процессоре определяются по рекуррентной формуле

$$V^k = \frac{2c}{f_k + f_1} \frac{\Delta f_{k,1} \cos \varepsilon_1}{\cos q_k - \cos q_1}, \quad (18)$$

а усреднённое значение модуля скорости – в результате статистической обработки.

Значения отсчётов горизонтальной дальности d_1^k в точке A_l нахождения РИО вычисляются в соответствующем процессоре по формуле

$$d_1^k = \frac{\bar{V}(k-1)\Delta t}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2 q_1}} [\text{ctg} \bar{q}_1 + \text{ctg} \Delta\beta_{k,1}] \quad (19)$$

при $k = \overline{3, K}$, а среднее значение \bar{q}_1 и дисперсия $\sigma_{q_1}^2$ – в результате статистической обработки значений отсчётов d_1^k .

Текущее значение горизонтальной дальности вычисляются по формуле

$$d_k = \frac{\bar{V}(k-1)\Delta t}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2 q_1}} \frac{1}{\sin \Delta\beta_{k,1}}. \quad (20)$$

Далее в центральном процессоре производятся расчёты наклонных дальностей и высот полёта как

$$D_k = \frac{d_k}{\cos \varepsilon_k(t_k)}, \quad H_k = d_k \text{tg} \varepsilon_k(t_k), \quad (21)$$

где $\cos \varepsilon_k(t_k)$ и $\text{tg} \varepsilon_k(t_k)$ – значения косинуса и тангенса угла места в моменты времени t_k .

Затем осуществляется построение траектории движения РИО в пространстве на начальном интервале её кусочно-линейной аппроксимации. Критерием сохранения гипотезы о равномерном и прямолинейном движении объекта является выполнение неравенств

$$|d_1^k - \bar{d}_1|^2 < 3\sigma_{d_1}^2, \quad |V^k - \bar{V}|^2 < 3\sigma_V^2, \quad (22)$$

где $3\sigma_{d_1}^2$, $3\sigma_V^2$ – пороговые значения величин d_1 и V , определяющие размеры участка кусочно-линейной аппроксимации траектории.

В момент, когда перестают выполняться соотношения (22), фиксируется начало маневра РИО, после чего задаются начальные значения азимута и угла места для следующего участка кусочно-линейной аппроксимации траектории и повторяют расчёты параметров $q_{тек}$, V , $D_{тек}$, $H_{тек}$.

После оптимизации составных частей системы (каналов наблюдения с устройствами первичной обработки и УВО) и последующей её рекомпозиции получим структурную схему пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской РЛС. Эта схема приведена на рис. 3, где приняты обозначения:

- 1 – антенная система (АС);
- 2 – опорно-поворотное устройство угла места (ОПУУМ);
- 3 – опорно-поворотное устройство азимута (ОПУАз);
- 4 – угловой датчик (УД);
- 5 – привод угла места (ПрУМ);
- 6 – привод азимута (ПрАз);
- 7 – радиоприёмное устройство (РПУ);
- 8, 9 – аналого-цифровые преобразователи (АЦП1, АЦП2);
- 10 – устройство восстановления несущей частоты (УВНЧ) принимаемого сигнала (схема Костаса);
- 11 – устройство выделения сигналов угловых рассогласований (УВСР);
- 12 – блок точности (БТ);
- 13, 14 – регуляторы программные (РП1, РП2);
- 15 – вычислитель периодограммы (ВПГ);
- 16 – вычислитель вида модуляции (ВВМ);
- 17 – измеритель параметров сигналов (ИПС);
- 18 – измеритель частоты несущей (ИЧ);

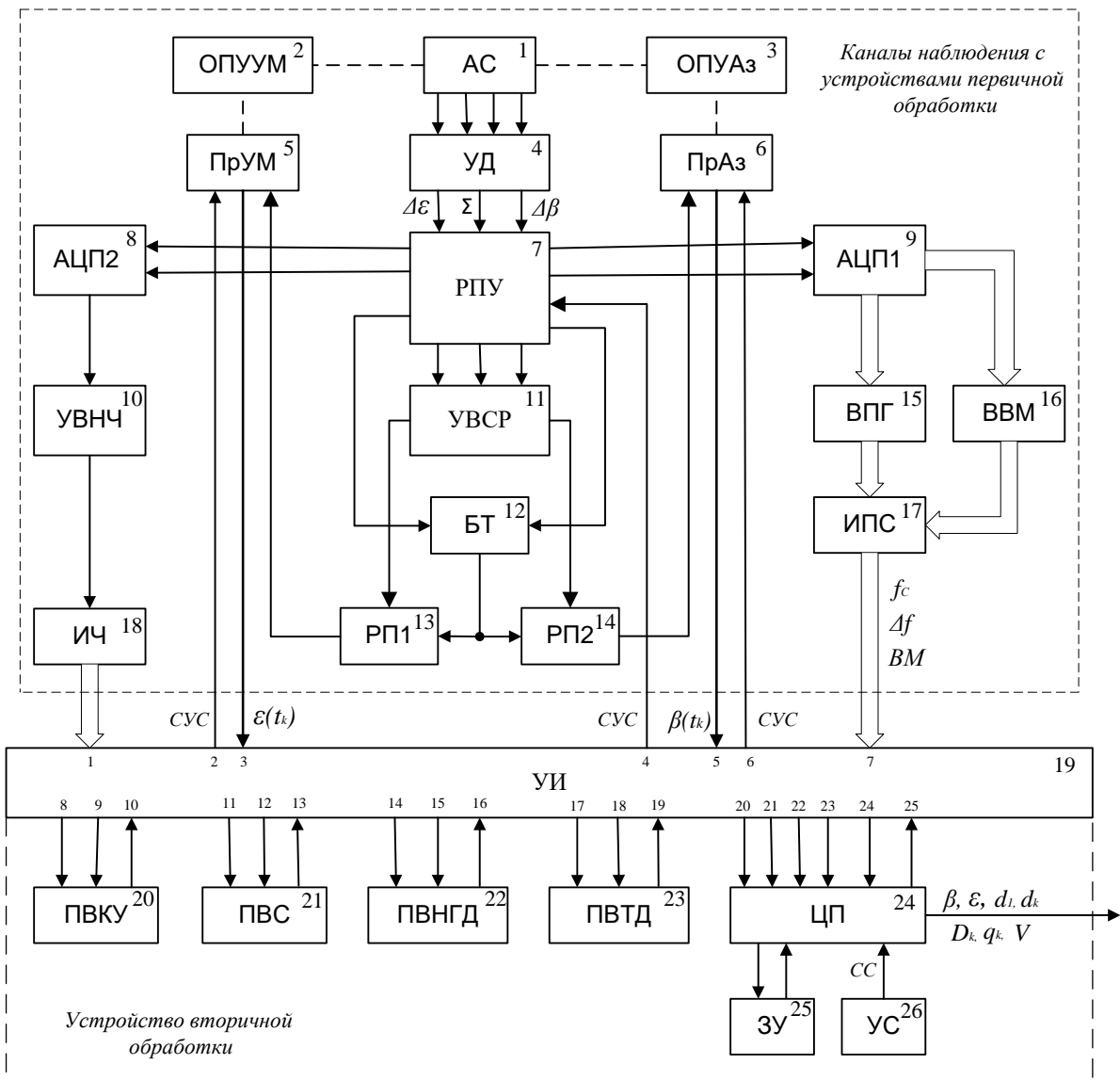


Рис. 3. Структурная схема пассивной угломерно-разностно-доплеровской РЛС.

- 19 – устройство интерфейсное (УИ);
- 20 – процессор вычисления курсового угла объекта (ПВКУ);
- 21 – процессор вычисления модуля скорости объекта (ПВС);
- 22 – процессор вычисления начальной горизонтальной дальности между РЛС и объектом (ПВНГД);
- 23 – процессор вычисления текущей дальности между РЛС и объектом (ПВТД);
- 24 – центральный процессор управления РЛС и расчёта траектории (ЦП);
- 25 – запоминающее устройство (ЗУ);
- 26 – устройство синхронизации (УС).

На рис. 3 использованы сокращения: ВМ – вид модуляции, СУС – сигналы управления и синхронизации, СС – сигналы синхронизации.

Структура схемы Костаса (прямоугольник 10 на рис. 3) показана на рис. 4, где приняты следующие обозначения:

- 1 – синхронный детектор (СД);
- 2 – фазовращатель (ФВ);
- 3 – фазовый детектор (ФД);
- 4 – генератор управляемый (ГУ);
- 5, 6, 7 – фильтры низкой частоты (ФНЧ1, ФНЧ2, ФНЧ3);
- 8 – сумматор (Σ).

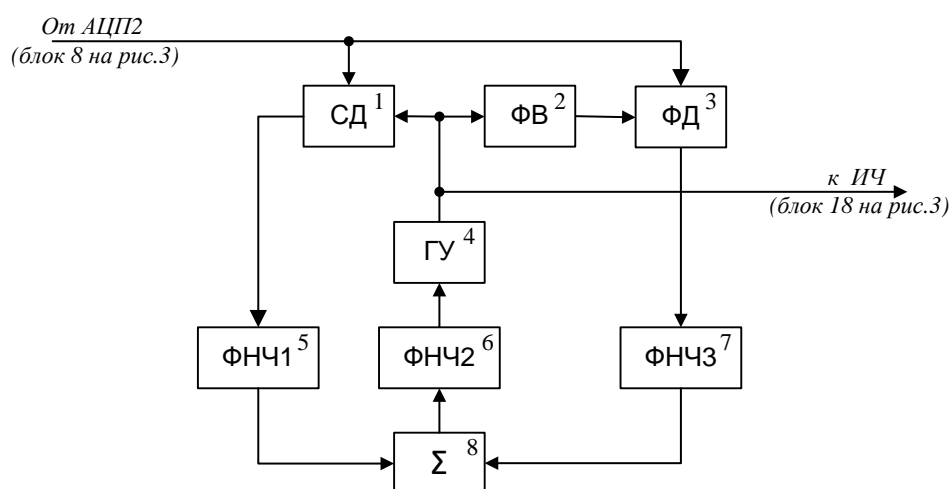


Рис. 4. Структурная схема устройства восстановления несущей.

Алгоритм функционирования пассивной однопозиционной РЛС может быть представлен в виде последовательности следующих операций.

1. Принимают с помощью антенны РЛС радиосигналы, констатируют обнаружение сигнала РИО, определяют спектральные параметры сигнала и вид модуляции, обеспечивающие восстановление несущей. Затем осуществляют автосопровождение объекта по угловым координатам, в процессе которого измеряют в моменты времени $t_k = k \Delta t$, где $k = \overline{1, K}$ – номера измерений, Δt – интервал времени между измерениями, и запоминают значения отсчетов УК (азимута β и угла места ε) и частоты f_H восстановленной несущей.

2. Представляют результаты измерений в виде зависимостей $\beta_{\text{мек}}(t_k)$, $\varepsilon_{\text{мек}}(t_k)$ и $f_{H \text{ мек}}(t_k)$. Фильтруют их для уменьшения ошибок измерений, получая усреднённые зависимости $\overline{\beta_{\text{мек}}}(t_k)$, $\overline{\varepsilon_{\text{мек}}}(t_k)$ и $\overline{f_{H \text{ мек}}}(t_k)$, и используют их в качестве первичных параметров при совместной обработке измерений. Усреднённые зависимости $\overline{\beta_{\text{мек}}}(t_k)$, $\overline{\varepsilon_{\text{мек}}}(t_k)$ и $\overline{f_{H \text{ мек}}}(t_k)$ интерполируют, получая непрерывные функции $\beta(t)$, $\varepsilon(t)$ и $f_H(t)$.

3. Извлекают из зависимости $\beta(t)$, начиная с момента времени t_1 и начального значения азимута β_1 , значения азимута β_k , отстоящие по времени на интервалы $t_k = k \Delta t$.

4. Вычисляют значения приращений азимута $\Delta\beta_{k,1} = \beta_k - \beta_1$.

5. Вычисляют приращения доплеровских сдвигов частоты принимаемых сигналов $\Delta f_{\text{дк},1} = f_{Hk} - f_{H1}$ на интервалах $\Delta t_{k,1}$, достаточно малых для справедливости предположения о равномерности и прямолинейности движения РИО со скоростью V на постоянной высоте H при горизонтальной скорости объекта. Геометрическая интерпретация приведенных выше соотношений представлена на рис. 2.

6. Находят, задавая значения $k = 2$ и 3 , приращения доплеровских сдвигов частоты $\Delta f_{\text{дк},1}$ на этих интервалах, затем вычисляют величину отношения (3).

7. Решая полученное уравнение (17), находят значение $\text{ctg } q_1$, откуда получают величину угла q_1 и определяют текущее значение курсового угла как $q_k = q_1 + \Delta\beta_{k,1}$.

8. Используя уравнение для приращения доплеровского сдвига частоты (18), находят модуль горизонтальной скорости, а затем – расстояние, пройденное РИО за интервал времени $(k-1)\Delta t$.

9. Определяют из соотношения (19) дальности d_1^k , а из соотношения (20) – дальность d_k .

10. Находят наклонные дальности и высоты, используя формулы (21).

11. Осуществляют построение траектории движения РИО в пространстве на начальном интервале кусочно-линейной аппроксимации. Критерием сохранения гипотезы о равномерном и прямолинейном движении радиоизлучающего объекта является выполнение неравенств (22).

12. В момент, когда перестают выполняться неравенства (22), фиксируют начало маневра объекта, после чего задают новые начальные значения азимута для следующего участка кусочно-линейной аппроксимации траектории и повторяют расчёты параметров $q_{тек}$, V , $D_{тек}$, $H_{тек}$ для построения траектории движения РИО в пространстве на последующих интервалах наблюдения.

Предложенные способ и алгоритм угломерно-разностно-доплеровской локации основаны на первичных измерениях неэнергетических параметров сигналов радиоизлучающих объектов. Поэтому реализующая эти способ и алгоритм РЛС может функционировать в условиях приёма флюктуирующих сигналов при достаточном отношении сигнал/шум, так как флюктуации уровней сигналов влияют лишь на характеристики обнаружения и на точность измерения их энергетических характеристик.

3. Оценка точности определения координат способом угломерно-разностно-доплеровской локации

Для оценки точности измерения координат РИО с помощью предложенного способа в зависимости от точности измерения совокупности первичных параметров (УК, времени, приращений доплеровских сдвигов несущих частот сигналов) был выполнен вычислительный эксперимент. В процессе его проводился расчёт функциональной зависимости от времени точных (модельных) значений координат РИО: горизонтальной дальности, текущих значений азимута $\beta_{тек}$ и несущей частоты f_H излучаемого сигнала, а также её доплеровских приращений. Затем рассчитывались зависимости $\beta_{тек}(t)$ и $f_{H тек}(t)$ с учётом ошибок их измерений, осуществлялся расчёт параметров

движения объекта по приведенным формулам и определялись среднеквадратические значения ошибок измерений путевого и курсового углов движения РИО, горизонтальной скорости и дальности до объекта путём сравнения их модельных и рассчитанных с учётом ошибок измерений значений.

Вычислительный эксперимент показал, что при ошибках измерения азимута σ_β , равным двум угловым минутам [10], частоты $\sigma_{f_H} = 0,5$ Гц и времени $\sigma_t = 10^{-6}$ с, относительные величины ошибок измерений курсового угла q движения РИО, скорости V его движения и горизонтальной дальности d соответственно равны

$$\frac{\sigma_q}{q} = 3\%, \quad \frac{\sigma_V}{V} = 1\%, \quad \frac{\sigma_d}{d} = 0,5\%.$$

Эти величины ошибок позволяют, например, в случае не разрешаемых по УК объектов селектировать их по скорости и дальности (при отличии по скорости на 2 м/с при скорости движения 200 м/с и по дальности на 1 км при расстоянии 100 км) и строить отдельно траектории их движения.

Разработанные способ и алгоритм, помимо обеспечения высокой точности определения координат перемещающихся в пространстве радиоизлучающих объектов, позволяют повысить функциональные возможности РЛС за счёт осуществления селекции этих объектов по скорости и построения отдельных траекторий их движения. Полученные результаты в 3 – 5 раз превосходят точностные характеристики известного способа [21].

Выводы

В результате проведенных исследований:

– разработан новый способ однопозиционного определения параметров движения радиоизлучающих объектов, описаны алгоритм функционирования и структура пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской радиолокационной системы, обеспечивающей определение скоростей, дальностей и траекторий движения радиоизлучающих объектов на основе

измерений их угловых координат и приращений доплеровских сдвигов несущих частот излучаемых ими сигналов с привязкой к единому времени;

– на основе вычислительного эксперимента выполнена оценка точностных характеристик однопозиционной радиолокационной системы, функционирующей в соответствии с предложенным способом и алгоритмом и обеспечивающей возможность измерения:

- скорости движения объекта с погрешностью 1%;
- направления его движения (курсового угла) с погрешностью 3%;
- дальности до объекта с погрешностью 0,5%

при погрешностях измерений угловых координат и частоты, равным 2 угловым минутам и 1 Гц, соответственно.

Литература

1. *Караваяев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь. 1987, 240 с.
2. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Под ред. проф. *Р.П. Быстрова и проф. А.В. Соколова*. М.: Радиотехника. 2008. 320 с.
3. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н.* Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь. 1986. 264 с.
4. *Меркулов В.И., Чернов В.С., Дрогалин В.В., Канащенков А.И. и др.* Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития. Под общей ред. *А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова*. М.: Радиотехника. 2003. 416 с.
5. *Шахтарин Б.И.* Обнаружение сигналов. М.: Гелиос АРВ. 2006. 525 с.
6. *Куликов Е.И., Трифонов А.П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио. 1978. 296 с.
7. *Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С.* Нейросетевой метод распознавания видов модуляции радиосигналов с использованием кумулянтов высокого порядка. // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2012. т.6, №9. С. 9 – 12.

8. Вопросы статистической теории радиолокации / Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М., Курикуша А.А., Репин В.Г., Тартаковский В.Г., Широков В.В. Под общей ред. проф. Г.П. Тартаковского. М.: Сов. радио. 1963. Т. 1, 425 с. 1964. Т. 2, 1080 с.
9. Балашов О.Е., Степашкин А.И. Алгоритм прогнозирования угловых координат объекта, движущегося прямолинейно равноускоренно // Вестник РГРТУ. 2012. № 3. С. 17 – 21.
10. Дятлов А.П., Дятлов П.А. Командная радиолиния с повышенной энергетической скрытностью // Специальная техника. 2015. № 6. С. 14 – 23.
11. Лавров Н.Ф. Вопросы теории ПУАЗО. М.: Оборонгиз. 1960, 480 с.
12. Алматов Б.А., Балашов О.Е. Измерение скорости объекта в системах автоматического сопровождения объектов // Вестник РГРТУ. 2014. № 4 (вып. 50). Часть 1. С. 5 – 10.
13. Патент 2617830, РФ, G01S 11/00, G01S 11/10. Способ пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской локации перемещающегося в пространстве радиоизлучающего объекта и радиолокационная система для реализации этого способа / Джисоев А.Л., Омельчук И.С., Тюрин Д.А., Фоминченко Г.Л., Фоминченко Г.Г., Яковленко В.В. Заявл. 11.04.2016, опубл 28.04.2017.
14. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. М.: Сов. радио. 1980. 358 с.
15. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный приём сигналов. М.: Сов. радио. 1975. 703 с.
16. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь. 1991. 608 с.
17. Патент 2583849, РФ, G01S 3/14, H01Q 25/02. Способ цифровой обработки сигналов при обзорной моноимпульсной амплитудной суммарно-разностной пеленгации с использованием антенной решётки (варианты) и обзорный моноимпульсный амплитудный суммарно-разностный пеленгатор с использованием антенной решётки и цифровой обработки сигналов /

Джиоев А.Л., Омельчук И.С., Фоминченко Г.Л., Фоминченко Г.Г., Яковленко В.В. Заявл. 13.04.2015, опубли. 10.05.2016.

18. Патент 2225990, РФ, G01S 3/14. Способ обработки сигналов при двухканальной амплитудной пеленгации / *Аветисянц В.А., Горовой А.В., Ларионов Б.А., Музыкаченко Н.Ю., Фоминченко Г.Л. Заявл. 30.08.2001, опубли. 20.03.2004.*
19. *Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В.* Случайные процессы. Том 4, оптимальное обнаружение сигналов. М.: Горячая линия – Телеком. 2017. 399 с.
20. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука. 1983. 304 с.
21. Патент 2557808, РФ, G01S 3/00. Способ определения наклонной дальности до движущейся цели пассивным моностатическим пеленгатором / *Борисов Е.Г., Мартемьянов И.С. Заявл. 9.04.2014, опубли. 27.07.2015.*

Ссылка на статью:

А. Л. Джиоев, И. С. Омельчук, Д. А. Тюрин, Г. Г. Фоминченко, Г. Л. Фоминченко. Способ пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской локации, структура и алгоритм функционирования реализующей его радиолокационной системы. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/13/text.pdf>