



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01S 3/80 (2023.02)

(21)(22) Заявка: 2022123377, 31.08.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.08.2022

Дата регистрации:
08.06.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.08.2022

(45) Опубликовано: 08.06.2023 Бюл. № 16

Адрес для переписки:

197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46,
Акционерное общество "Концерн
"Океанприбор"

(72) Автор(ы):

Гампер Лев Евгеньевич (RU),
Сопина Ольга Павловна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Концерн
"Океанприбор" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2623831 C1, 29.06.2017. RU
2711432 C1, 17.01.2020. RU 2724315 C1,
22.06.2020. RU 2507531 C1, 20.02.2014. WO
2008138433 A1, 20.11.2008. RU 2009122420 A,
20.12.2010. RU 2680860 C1, 28.02.2019.

(54) Способ определения дальности до движущегося источника излучения пассивным гидролокатором

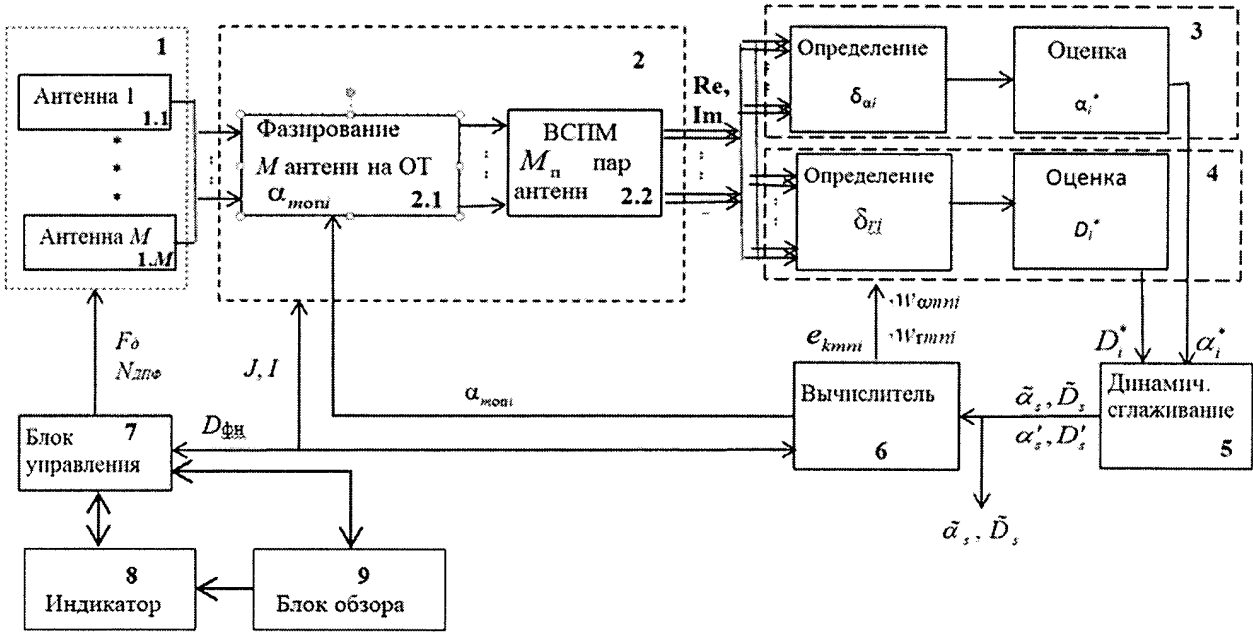
(57) Реферат:

Использование: изобретение относится к области гидроакустики. Сущность: в способе определения дальности до движущегося источника излучения пассивным гидролокатором, содержащим M разнесенных гидроакустических антенн ($M \geq 3$), с предварительной обработкой, включая дискретизацию, цифровое преобразование и преобразование Фурье (ПФ), средства обзора в заданном секторе наблюдения и интервале дальностей, определение координат обнаруженной сигнальной отметки на индикаторе обзора α_n, D_n , а для определения и сопровождения текущего направления на движущийся источник излучения $\alpha_s^*(t)$ фазируют каждую m -ую антенну в направлении от ее центра на ОТ, на каждом i -м цикле ДПФ измеряют комплексные попарные взаимные спектры плотности мощности (ПВСПМ) сигналов пар антенн приемной системы и используют дискриминатор отклонений направления. Для определения текущего значения дальности на каждом i -м цикле ДПФ используют

дискриминатор отклонения ее опорного значения дальности $D_{опi}$ от искомого истинного D_{Si} , применяя при этом нелинейную шкалу дальностей до виртуальных точек фокусировки приемной системы $R_{\phi i}$ с координатами $\langle \alpha_{опi}, \gamma_{\phi} \rangle$, для чего на линейной шкале D назначают заранее нижнюю границу интервала дальностей $D_{\phi n}$, в котором предположительно будет перемещаться источник излучения в процессе наблюдения и сопровождения: $D \geq D_{\phi n}$, и на каждом очередном i -м цикле ДПФ назначают в нем опорную виртуальную точку фокусировки приемной системы $R_{\phi i}$ с координатами $\langle \alpha_{опi}, \gamma_{опi} \rangle$, таким образом, что направление на $R_{\phi i}$ совпадает с $\alpha_{опi}$, а дальность $\gamma_{опi}$ связана с $D_{опi}$ жесткой нелинейной зависимостью: $r_{\uparrow i} = D_{\uparrow i}^{-1} \cdot \gamma_{\phi}$, где γ_{ϕ} - масштабный коэффициент, и определяют величину и знак отклонения δ_{Ri} текущего опорного значения $\gamma_{опi}$ от искомого значения

дальности до виртуального источника, а текущую оценку фактической дальности на i -м цикле ДПФ определяют как $D_{i|i}^* = D_{i|i} - \delta_{Ri}^*$ и подвергают динамическому осреднению известными методами

определения параметров последовательных измерений и прогноза их значений на последующие циклы измерений. Технический результат: повышение точности определения дальности, особенно при больших значениях D/V , где V - базовый размер ПС. 1 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 3

RU 2797779 C1

RU 2797779 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01S 3/80 (2023.02)

(21)(22) Application: **2022123377**, **31.08.2022**

(24) Effective date for property rights:
31.08.2022

Registration date:
08.06.2023

Priority:

(22) Date of filing: **31.08.2022**

(45) Date of publication: **08.06.2023** Bull. № 16

Mail address:

**197376, Sankt-Peterburg, Chkalovskij pr., 46,
Aksionernoe obshchestvo "Kontsern
"Okeanpribor"**

(72) Inventor(s):

**Gamper Lev Evgenevich (RU),
Sopina Olga Pavlovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Aksionernoe obshchestvo "Kontsern
"Okeanpribor" (RU)**

(54) **METHOD FOR DETERMINING THE RANGE TO A MOVING RADIATION SOURCE USING PASSIVE SONAR**

(57) Abstract:

FIELD: hydroacoustics.

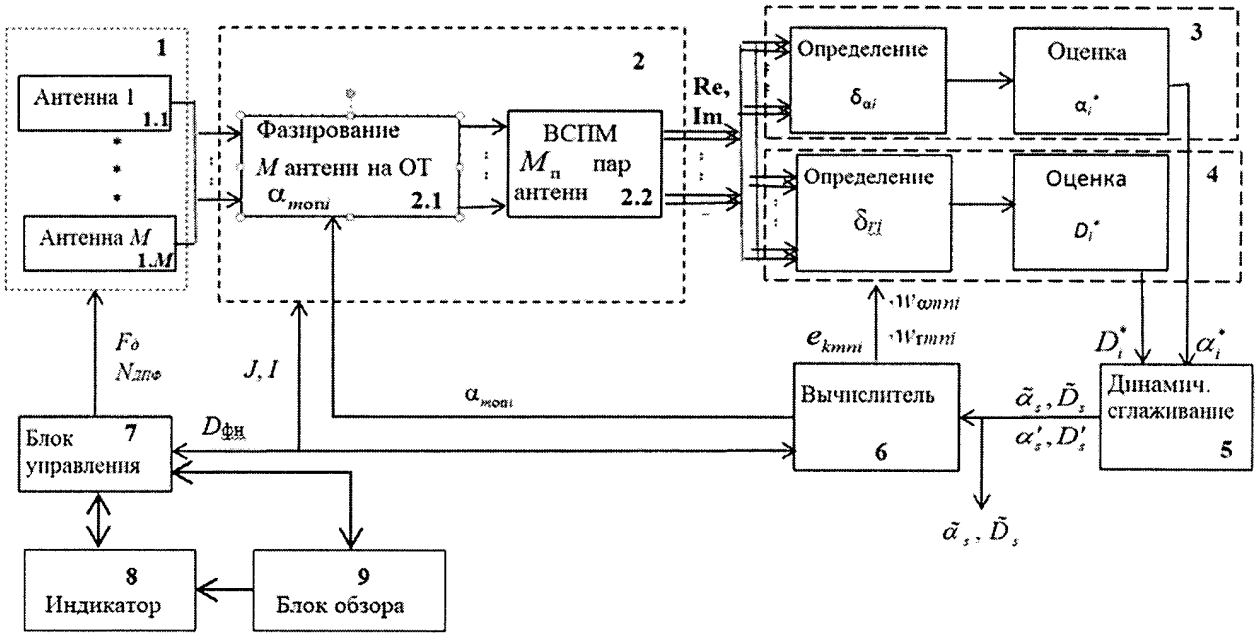
SUBSTANCE: method for determining the range to a moving radiation source using a passive sonar contains M spaced sonar antennas ($M \geq 3$), preliminary processing, including discretization, digital transformation and Fourier transform (FT), means of review in a given sector of observation and range interval, identification of the coordinates of the detected signal mark on the view indicator α_n , D_n , and to determine and track the current direction to a moving radiation source $\alpha_s^*(t)$ each m -th antenna is phased in the direction from its center to the OT, at each i -th DFT cycle, the complex paired mutual power density spectra (PMPDS) of the signals of the antenna pairs of the receiving system are measured and the direction deviation discriminator is used. To determine the current range value on each i -th cycle of the DFT, the discriminator of the deviation of its reference range value D_{refi} from the desired true D_{Si} is used, while applying a nonlinear range scale to the virtual focus points of the receiving system R_{fi} with coordinates

$\langle \alpha_{refi}, r_{fi} \rangle$, for which the lower limit of the range interval D_{fn} is predetermined on the linear scale D , in which the radiation source is supposed to move in the process of observation and tracking: $D \geq D_{fn}$, and on each next i -th cycle of the DFT the reference virtual focusing point of the receiving system R_{fi} with coordinates $\langle \alpha_{refi}, r_{refi} \rangle$ is designated in it so that the direction to R_{fi} coincides with α_{refi} , and the range r_{refi} is related to D_{refi} by a rigid non-linear relationship: $r_{refi} = D_{refi}^{-1} * \gamma_f$, where γ_f is the scale factor, and the magnitude and sign of the deviation δ_{Ri} of the current reference value r_{refi} is determined based on the desired range value to the virtual source, and the current estimate of the actual range on the i -th DFT cycle is determined as $D_{refi}^* = D_{refi} - \delta_{Ri}$; and subjected to dynamic averaging by known methods for determining the parameters of successive measurements and predicting their values for subsequent measurement cycles.

EFFECT: improving the accuracy of determining

the range, especially at large values of D/B , where B is the base size of the PS.

2 cl, 5 dwg



Фиг. 3

RU 2797779 C1

RU 2797779 C1

Изобретение относится к области гидроакустики, а именно к пассивной гидролокации, использующей бортовые, буксируемые и стационарные протяженные и разнесенные антенны, и может быть использовано в ближней зоне излучения источника с круговым (сферическим, цилиндрическим) волновым фронтом, а также в атмосферной акустике и пассивной радиолокации.

При пассивной гидролокации (ПГЛ) источников гидроакустического излучения в ближней зоне поля источника (зоне Френеля) используют протяженные (широкоапертурные) приемные системы (ПС) из M ($M \geq 3$) гидроакустических приемников или разнесенных направленных локальных антенн (далее «антенн ПС»). Средства предварительной и межантенной пространственно-временной обработки информации (МА ПВО) обеспечивают двух-координатный обзор в заданном секторе направлений α и интервале дальностей D на индикаторе с координатной сеткой $\langle \alpha, D \rangle$ [Гампер Л.Е. Оптимальная пространственно-временная обработка в системах пассивной гидролокации с разнесенными антеннами // Научно-техн. сб. Гидроакустика. Вып. 10 СПб., 2009. С. 49-60]. Эти средства обеспечивают наблюдение «полезного» сигнала источника излучения S в виде «сигнальной отметки», обусловленной «откликом» приемной системы на его сигнал на фоне выбросов помехи, с «главным (глобальным)» максимумом, обеспечивающим считывание искомым координат источника излучения α_S, D_S на шкалах α, D [Патент РФ №2507531, регистрация в Госреестре 20.02.2014.].

МА ПВО включает «фокусирование» приемной системы в точку предполагаемого расположения источника путем компенсации разности времен прихода сигнала от источника S к центрам антенн ПС («фазирования» антенн) и определения квадрата модуля суммы этих сигналов. Другим методом МА ПВО, применяемым для точного отсчета и автосопровождения координат источника излучения, является использование дискриминации отклонения текущих значений оценок направления $\alpha^*(t)$ и дальности $D^*(t)$ от их опорных значений $\alpha_{оп}(t)$ и дальности $D_{оп}(t)$, заданных или отслеженных по предыдущим измерениям, системой [Лоскутова Г.В., Полканов К.И. Пространственно-частотные и частотно-волновые методы описания и обработки гидроакустических полей. СПб.: «Наука». 2007].

Определение дальности в ближней зоне связано со специфической сложностью. Она заключается в том, что главный и боковые максимумы отклика сфокусированной приемной системы $z_{max}(\alpha, D)$ в зоне Френеля обладают свойством асимметричного расширения в дальностном сечении $z_{max}(D, \alpha_S = const)$ при увеличении измеряемого параметра D [Le Cadre J.P. Performance Analysis of Wavefront Curvature Methods for Range Estimation. IEEE Trans, on Aerospace and Electronic. Vol. 31, No. 3, July 1995. P. 1082-1103]. Это асимметричное расширение при малых дальностях невелико, но на больших расстояниях быстро увеличивается, ухудшая точность определения координаты и разрешение источников по дальности при $D_S \gg V_{ПС}$, где D_S - дальность до источника, $V_{ПС}$ - базовый размер ПС (расстояние между центрами крайних антенн ПС). При расширении главного максимума отклика уменьшается также крутизна дискриминационной характеристики (зависимость выходного значения дискриминатора от величины искомого отклонения, т.е. чувствительность), т.к. она пропорциональна его производной, следовательно, увеличивается погрешность σ_D оценки дальности и ее зависимость от измеряемого параметра D_S . Это свойство асимметричного расширения дальностного сечения отклика приемной системы, уменьшения крутизны дискриминационной характеристики дальности и увеличения погрешности со оценки

дальности является объективным [Статья Le Cadre J.P.], «геометрической» особенностью пространственной избирательности приемной системы в ближней зоне [Schultheiss P.M. Passive Sonar Detection in the presence of Interference // Journ. Acoust. Soc. Am. 1968. V. 43. P. 418-425]. При этом сечение по направлению не зависит от дальности, аналогично характеристике направленности антенны в дальней зоне. Целью предлагаемого технического решения является повышение точности определения дальности до источника излучения на любом расстоянии в интервале наблюдения в ближней зоне путем уменьшения «геометрической» зависимости крутизны дискриминационной характеристики от измеряемого параметра - дальности.

Известен способ определения угла прихода плоско-волнового фронта сигнала движущегося источника в дальней зоне двухканальной приемной системой [Лоскутова Г.В. и др.]. Для этого используются измерительные устройства, содержащие дискриминаторы измеряемого параметра и динамические сглаживающие устройства. В этом способе используют приемную систему из двух антенн или антенну со сформированными на ней двумя (или более) каналами с фазовыми центрами, разнесенными на расстояние d_{ϕ} (например, центрами двух половин антенны). Антенны каналов компенсируют (фазируют) независимо, в одном назначенном опорном направлении $\alpha_{оп}$ и, для определения искомого неизвестного направления α_s измеряют величину и знак отклонения опорного направления $\alpha_{оп}$ от искомого неизвестного α_s , используя сигналы обоих каналов, а потом корректируют опорное направление на величину измеренного отклонения δ_{α} . Особенностью этого метода дискриминации является то, что ее характеристика (ДХ) $\hat{z}(\alpha - \alpha_{оп})$ пропорциональна производной характеристики направленности (ХН) антенны $z(\alpha, \alpha_{оп})$. Главный максимум ХН - приблизительно симметричная функция относительно $\alpha_{оп}$, с максимумом в точке ($\alpha = \alpha_{оп}$), следовательно ДХ - антисимметричная функция с нулевым значением в точке ($\alpha = \alpha_{оп}$). Линейный (приблизительно, «квазилинейный») участок в окрестностях нулевого значения используется для измерения отклонения δ_{α} с использованием крутизны ДХ:

$$\xi_{ДХ} = \left. \frac{\partial \hat{z}(\alpha - \alpha_{оп})}{\partial \alpha} \right|_{\alpha = \alpha_{оп}}$$

Недостатки этого способа заключаются в том, что, во-первых в нем используют информацию только двух приемных каналов, в то время как пассивное определение дальности по кривизне волнового фронта в круговом поле возможно лишь при $M \geq 3$, во-вторых он может быть использован только для определения одной координаты - угла прихода сигнала с плоским волновым фронтом, а целью пассивной гидролокации является определение и направления и дальности, в общем случае также и угла места. Для определения координат источника излучения, в том числе дальности при приеме сигнала с круговым (сферическим, цилиндрическим) волновым фронтом, этот метод не может быть использован, но сам метод дискриминации отклонения, как показано ниже, применен и в прототипе и в предлагаемом способе, с необходимыми изменениями и новыми признаками, для определения как направления, так и дальности.

Для уменьшения зависимости крутизны характеристики дискриминатора от измеряемого параметра - дальности необходимо выбрать некоторые параметры модели системы <источник/ приемники ПС> и способ их деформации в нужном направлении для преобразования формы ДХ, обеспечивающего стабилизацию ее крутизны в необходимом интервале дальностей D.

Известны методы изменения с какой-либо целью формы графического изображения

объекта на индикаторной картине по принципу «кривого зеркала»: путем изменения линейного масштаба изображения по той или иной оси графика по заданному нелинейному правилу. Известным примером этого метода является логарифмическая шкала, когда график $z(x)$ с линейной шкалой x заменяют графиком $\hat{z}(\log x)$, при этом значения распределяются на шкале нелинейно и не эквидистантно, что в некоторых случаях неудобно наблюдателю. Другим примером этого метода является замена графика $z(x)$ с линейной шкалой x , графиком $z'(x^{-1})$, в котором помечены деления шкалы x^{-1} соответствующими значениями x с неравномерным шагом (что также не всегда удобно на практике). Этот метод частично решает одну из поставленных выше задач, позволяя получить дискриминационную характеристику приблизительно одинаковой крутизны в окрестностях нулевого отклонения $x - x_0=0$, однако, это не улучшает точности определения параметра x , т.к. сама зависимость (уже измеренная) при этом не меняется, а лишь графически деформируется.

Известны также методы определения координат движущегося источника излучения путем динамической обработки последовательности измерения направления на него [Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. М.: Сов. радио. 1967]. В них часто используется прием оценки не самого искомого параметра - дальности D , а параметра $R=D^{-1}$, что позволяет упростить решение задачи с меньшими вычислительными ресурсами. Недостатки этих методов: использование только измерений направления, большое время решения задачи, необходимость гипотезы о характере траектории источника и др.

Наиболее близким по совокупности общих признаков к предлагаемому техническому решению является «Способ пассивного определения координат движущегося источника излучения» [Патент РФ №2623831, опубликовано 29 июня 2017 г.], содержащий прием сигналов с круговым волновым фронтом приемной системой (ПС) из M антенн ($M \geq 3$), расположенных в пространстве известным образом, предварительную и меж-антенную пространственно-временную обработку, индикатор с двух-координатной сеткой и шкалами направления α и дальности D , отображающими расположение источников излучения в поле наблюдения в виде сигнальных отметок. Для точного определения координат и сопровождения назначают опорную точку (ОТ) с координатами $\alpha_{оп}$ и $D_{оп}$, которые в момент наведения принимают равными: $\alpha_{оп}(t_0)=\alpha_{max}(t_0)$ и $D_{оп}(t_0)=D_{max}(t_0)$ а далее, в процессе их сопровождения, корректируют и прогнозируют известными методами динамического сглаживания оценок [Кузьмин С.З., монография].

На каждом i -м цикле ДПФ по принятым антеннами сигналам определяют оценки отклонения $\delta_{\alpha i}$, $\delta_{D i}$ координат ОТ от искомым текущих координат $\alpha_s(t_i)$, $D_s(t_i)$ источника соответственно, для чего фазируют каждую m -ю антенну в направлении от ее центра на ОТ и формируют mn -е пары антенн, с $m, n=1, \dots, M$, при $m < n$, всего $(M^2-M)/2=M_{\Pi}$ пар с неповторяющимися индексами mn . Для каждой mn -й пары антенн измеряют попарные взаимные спектры плотности мощности (ПВСПМ) сигналов. Последующие этапы определения оценок отклонений направления $\delta_{\alpha i}$ и дальности $\alpha_{D i}$ в прототипе различны. Угловые сечения отклика ПС, подобно характеристикам направленности антенн в дальнем поле, симметричны относительно направления фазирования и в первом приближении мало зависят от направления и дальности, а дискриминационная характеристика отклонения направления (ДХН) приблизительно антисимметрична относительно нулевого значения при $\alpha_{оп i}=\alpha_{S i}$. Поэтому для дискриминации $\delta_{\alpha i}$

используют известный метод [Лоскутова Г.В. и др., монография], включающий: вычисление разностей τ_{mni} времен прихода сигнала из точки S к центрам каждой mn-й пары антенн и весовых коэффициентов $w_{amni} = \partial \tau_{mni} / \partial \alpha$. Определяют значение

5 «измерительной» части ДХН - c_1 , суммируя по частоте значения ПВСПМ каждой пары с умножением на частотную характеристику приемного тракта по выходу предварительной обработки h_k , на коэффициент $\exp(-j2\pi f \tau_{mni})$ компенсации разности времен прихода сигнала mn-й пары антенн и на частоту f_k , затем суммируя результаты
10 всех пар антенн с весовыми коэффициентами w_{amni} . Аналогично определяют значение «нормирующей» части ДХН - c_2 , только в первой сумме слагаемые умножают на квадрат частоты, а во второй - на квадрат w_{amni} . Таким образом, получают значение отклонения направления $\delta_{ai} = c_1/c_2$, в единицах измеряемого параметра, а оценку направления на i-м
15 цикле ДПФ определяют как: $\alpha_{si}^* = \alpha_{opi} - \delta_{ai}$.

Для упрощения описания (без потери существа рассматриваемых признаков) условимся считать, что крутизна нормированной ДХ не зависит от уровня сигнала (поддерживается независимой регулировкой мощности источника излучения), а средне-
20 квадратическое отклонение (СКО) флуктуаций выходного значения дискриминатора определяется отношениями сигнал/помеха на выходах антенн, которые для упрощения примем постоянным и одинаковым на всех антеннах ПС.

В отличие от направления, дальностные сечения отклика ПС не симметричны и их форма и ширина главного максимума сильно зависят от дальности, точнее от отношения D_S/B , где B - размер базы ПС. Соответственно и дискриминационная характеристика
25 дальности (ДХД) не является антисимметричной кривой, и ее крутизна на линейном участке зависит от дальности, быстро уменьшаясь с увеличением D_S/B , в связи с чем, использовать тот же алгоритм определения отклонения по дальности, что и по направлению не целесообразно. Поэтому в прототипе предложено измерять не
30 отклонение δ_{Di} , а искать точку пересечения ДХ $\hat{z}(\alpha - \alpha_{opi})_i(D)$ оси дальностей D, иначе говоря искать нулевую точку ДХ на оси D в окрестностях D_{opi} . Для этого сканируют величину D в окрестностях D_{opi} , используя M_{Π} нечетных попарных взаимно-корреляционных функций (НВКФ) сигналов антенн, комплексное накопление и обратное преобразование Фурье.
35

Преимущество этого способа заключается в повышении точности определения координат движущегося источника излучения благодаря использованию дискриминационного метода оценок координат (нулевой отсчет) и уменьшения ошибок, связанных с «инерционностью» статического осреднения, зависящих от скорости
40 относительного перемещения источника и приемников. К недостаткам способа следует отнести «геометрическую» зависимость погрешности определения дальности σ_D от величины измеряемой дальности из-за уменьшения крутизны характеристики дискриминатора дальности Δ_D с увеличением ее значения D_S .

Задачей изобретения является повышение точности определения дальности до
45 источника излучения пассивным гидролокатором в ближней зоне поля движущегося источника излучения в интервале наблюдения, путем уменьшения «геометрической» зависимости крутизны дискриминационной характеристики дальности от измеряемого параметра.

Техническим результатом предлагаемого изобретения является обеспечение дискриминации отклонения оценки дальности с характеристикой, квазиинвариантной к значению дальности в заданном интервале наблюдения пассивного гидролокатора, что приводит к повышению точности определения дальности, особенно при больших значениях отношения дальности D к базовому размеру ПС: $D/V_{ПС}$.

Для обеспечения указанного технического результата в способ пассивного определения координат движущегося источника излучения, содержащий прием сигналов M антеннами пассивного гидролокатора, $M \geq 3$, предварительную обработку, включающую усиление, фильтрацию с частотной характеристикой h_k в полосе приема $f_H \leq f_k \leq f_B$, синхронную дискретизацию, цифровое преобразование, циклическое дискретное преобразование Фурье (ДПФ), средства обзора в заданном угловом секторе наблюдения и интервале дальностей, определение координат обнаруженной сигнальной отметки на индикаторе обзора α_0^* , D_0^* , которые на момент начала работы средств точного определения координат и сопровождения используют как опорную точку (ОТ) с координатами $D_{оп}(t_0) = D_0^*$, $\alpha_{оп}(t_0) = \alpha_0^*$, а для определения и сопровождения текущего направления на движущийся источник излучения $\alpha_s^*(t)$ фазируют каждую m -ю антенну в направлении от ее центра на опорную точку (ОТ) и на каждом i -ом цикле ДПФ измеряют комплексные попарные взаимные спектры плотности мощности (ПВСПМ) сигналов всех mn -х пар антенн приемной системы ($m, n = 1, \dots, M$), используют дискриминацию текущих отклонений направления от опорной точки $\alpha_{опi}$ и известные методы динамического сглаживания последовательности оценок $\alpha_{si}^*(t_i)$, введены следующие новые признаки:

для определения текущего значения дальности пассивным гидролокатором на каждом i -м цикле ДПФ используют дискриминацию отклонения ее опорного значения дальности $D_{опi}$ от искомого истинного D_{Si} , применяя при этом нелинейную шкалу дальностей r_ϕ до виртуальных точек фокусировки приемной системы с координатами $\langle \alpha_{опi}, r_\phi \rangle$, для этого на линейной шкале дальности D назначают заранее нижнюю границу $D_{\phi n}$ интервала дальностей, в котором предположительно будет перемещаться источник излучения в процессе наблюдения и сопровождения: $D \geq D_{\phi n}$. Верхняя граница определяется только валидностью применения метода кривизны волнового фронта в данных конкретных условиях - мощностью источника, отношением сигнал/помеха, гидрологией, техническим уровнем чувствительности к фазовым соотношениям сигналов антенн ПС и пр.). На каждом очередном i -м цикле ДПФ назначают виртуальную опорную точку фокусировки приемной системы $R_{опi}$ с координатами $\langle \alpha_{опi}, r_{опi} \rangle$, таким образом, что направление на $R_{опi}$ совпадает с $\alpha_{опi}$, а дальность $r_{опi}$ связана с $D_{опi}$ нелинейной зависимостью: $r_{ii} = D_{ii}^{-1} \cdot \gamma_\phi$ где γ_ϕ - масштабный коэффициент, равный квадрату нижней границы $D_{\phi n}$: $\gamma_\phi = D_{\phi n}^2$, и определяют величину и знак отклонения δ_{Ri} текущего опорного значения $r_{опi}$ от искомого значения дальности до виртуального источника, а текущую оценку фактической дальности на i -м цикле ДПФ определяют

как $D_{i i i}^* = D_{i i i} - \delta_{R i}^*$ и подвергают последующему динамическому осреднению

известными методами определения параметров последовательных измерений и прогноза их значений на следующие циклы измерений.

5 Для определения величины и знака отклонения $\delta_{r i}$ текущего опорного значения $r_{o p i}$

от искомого значения дальности до виртуального источника $r_{\phi S i} = D_{S i}^{-1} \cdot \gamma_{\phi}$, используют

дискриминацию отклонения дальности. Для этого рассчитывают разность времен

10 распространения сигнала $t_{m R i}$ из виртуальной точки $R_{o p i}(\alpha_{o p i}, r_{o p i})$ к центрам O_m, O_n

каждой $m n$ -й пары антенн: $\tau_{m n R i} = t_{m R i} - t_{n R i}$ ($m, n = 1, \dots, M$) по формулам тригонометрии,

используя скорость звука в среде c , а также весовые коэффициенты $w_{r m n i}$, равные

производной разности времен распространения $\tau_{m n R i}$ по r_i , т.е.

15 r_i , т.е. $w_{r m n i} = \partial \tau_{m n R i}(\alpha_{o p i}, r_{o p i}) / \partial r \Big|_{r=r_{o p i}}$, суммируют по частоте f_k мнимые части ПВСПМ

каждой $m n$ -й пары антенн в полосе приема $[f_H, f_B]$ с умножением каждого слагаемого

на коэффициент частотной характеристики h_k , на частоту f_k и на коэффициент $e_{k m n i} = \exp$

($-j 2 \pi f_k \tau_{m n R i}$) компенсации разности времен распространения сигнала от опорной

20 виртуальной точки $R_{\phi i}$ к центрам каждой $m n$ -й пары антенн, в результате получают

для каждой $m n$ -й пары суммарные величины $S_{m n i}$ i -го цикла ДПФ, затем суммируют

по частоте f_k вещественные части ВСПМ с умножением каждого слагаемого на h_k , на

коэффициент компенсации $e_{k m n i}$ и на квадрат частоты f_k^2 , получая для каждой пары

25 суммарную величину $G_{m n i}$, затем суммируют по индексу $m n$ величины $S_{m n i}$ с весовыми

коэффициентами $w_{r m n i}$, получая величину c_i , которую делят на сумму по индексу $m n$

величин $G_{m n i}$ с тем же весовым коэффициентом в квадрате $w_{r m n i}^2$, получая величину

30 g_i и определяют отклонение $\delta_{r i} = c_i / g_i$, выполняют осреднение оценок отклонения $\delta_{r i}$ по

$i = 1, 2, \dots, I$ циклам ДПФ, получая малоосредненную оценку $\delta_{r i}^*$, а текущую оценку

35 фактической дальности на i -м цикле ДПФ определяют как $D_{o p i}^* = D_{o p i} - \delta_{r i}^*$.

Введение новых признаков позволяет повысить точность определения дальности до

движущегося источника излучения пассивным гидролокатором на больших дальностях

путем обеспечения высокой крутизны дискриминационной характеристики дальности

40 (ДХД) - на уровне ее значения в заданной нижней границе интервала наблюдения $D_{\phi H}$,

и ее стабилизации на любом расстоянии в интервале ближней зоны. Масштаб угловых

сечений при этом не меняется. Новизна предлагаемого решения заключается в том,

что при формировании дискриминационной характеристики используют нелинейный

45 масштаб в дальностных сечениях, вида: $r_{\phi} = D_S^{-1} \cdot \gamma_{\phi}$. Этот масштаб обладает следующими

дискриминационная характеристика дальности формируется с использованием значений

расстояния в интервале $r_{\phi} = 0 \div D_{\phi H}$, где велика крутизна ДХД, и при этом сохраняется

тождество*): $|r_{\phi S} - r_{\phi} = D - D_S = 0$ $\Big|_{D=D_S}$, т.е. нулевое значение виртуальной ДХД на основной, линейной шкале дальностей D всегда находится в точке фактического расположения источника излучения D_S , а ее крутизна близка к крутизне на дальности $r_{\phi n}$, даже
 5 несколько увеличиваясь с увеличением фактической дальности D_S . Предложенный выбор нелинейности использует особенность геометрии фрагмента дуги радиуса R_d , стянутого хордой L_d : высота его сегмента h_d равна: $h_d = R_d \cdot (1 - \cos \frac{\alpha_d}{2})$, где α_d -
 10 центральный угол дуги. Применяя метод приближенных вычислений при $R_d \gg L_d/2$, можно получить: $h_d < R_d^{-1} \cdot \eta_d$, где η_d - коэффициент, определяемый геометрией схемы
 <дуга/радиус>: $\eta_d = \frac{L_d^2}{8R_d}$. Применяя эту нелинейную зависимость в расчетах

15 коэффициента компенсации разности времен распространения сигнала от опорной виртуальной точки $R_{\phi i}$ к центрам каждой m -й пары антенн $e_{kmni} = \exp(-j2\pi f_k \tau_{mnRi})$ получают стабильную форму главного максимума отклика ПС и ДХД.

*) Примечание: Обратим внимание, что при переходе от прямой фокусировки в точку S к фокусировке в виртуальную точку R_{ϕ} знак ДХД меняется на обратный (см. фиг.5).

20 Сущность предполагаемого изобретения поясняется фигурами 1-5:

Фиг. 1 геометрическая схема системы «источник-антенны» для пассивного гидролокатора с тремя антеннами.

25 Фиг. 2 графики, поясняющие соотношения дальностей до точек фокусировки приемной системы при реальных (прототип) и виртуальных (предлагаемых) положениях источника излучения.

Фиг. 3 схема пассивного гидролокатора, решающего задачу определения дальности предлагаемым способом.

30 Фиг. 4 схема блока 4 определения дальности до источника излучения предлагаемым способом.

Фиг. 5 графики дискриминационных характеристик отклонений дальности от опорной точки при использовании традиционного и предлагаемого способов дискриминации в интервале дальностей, фиг. а) по способу-прототипу, б) по предлагаемому способу.

35 Принцип действия предполагаемого изобретения можно пояснить на примере, реализующем решение двух-координатной задачи с тремя линейно расположенными антеннами A_1, A_2, A_3 , как показано на схеме Фиг. 1. где O_1, O_2, O_3 - центры антенн ПС, S - источник излучения с координатами (α_s, D_s) , $D_{\phi n}/R_{\phi n}$ - общая точка линейной шкалы D и нелинейной R с координатами $(\alpha_s, r_{\phi n})$.

40 На графиках фиг. 2 показано соотношения дальностей до точек фокусировки приемной системы в реальных D_{ϕ} (прототип) и виртуальных r_{ϕ} (предлагаемых) положениях источника излучения, D_s - положение некоторого источника S на линейной шкале D_{ϕ} , $r_{\phi S}$ - положение его же на нелинейной шкале r_{ϕ} .

45 Предлагаемый способ может быть реализован с помощью устройства (пассивного гидролокатора), схемы которого представлены на фиг. 3, 4. Устройство (фиг. 3), содержит известные блоки и модули по предлагаемому способу: блок приемной системы 1 из M антенн 1.1 + 1.М, в блоке 2: модуль фазирования 2.1 (известными методами предварительной обработки и формирования направленности антенн) и модуль

измерения взаимных спектров плотности мощности (ВСПМ) с выходов всех пар антенн - модуль 2.2, блоки определения малоосредненных оценок: направления α_i^* - блок 3

5 (например, по Патенту РФ №2623831) и дальности D_i^* - блок 4 (по предлагаемому способу), блок динамического сглаживания 5 (программируемый процессор), вычислитель 6 (программируемый процессор), блок управления 7 (программируемый контроллер), индикатор 8 и блок обзора 9 (например, по Патенту РФ №2507531).

10 Блок 1 включает М антенн, а также элементы предварительной обработки, управляемые из блока 7: синхронную дискретизацию с частотой F_{∂} , цифровое преобразование, циклическое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) выборки объема $N_{\text{ДПФ}}$ сигналов с выходов антенн.

15 Блок 2 включает модуль 2.1 фазирования антенн в направлениях от центра антенны на опорную точку (ОТ) $\alpha_{\text{опи}}$, $m=1 \div M$, и модуль 2.2 формирования $M_{\text{П}}$ пар m -х антенн и определения комплексных взаимных спектров плотности мощности (ВСПМ) их сигналов. Координаты ОТ поступают из блока 6 (вычислитель) по результатам динамического сглаживания оценок координат $\tilde{\alpha}_{si}, \tilde{D}_{si}$ и их производных α'_s, D'_s в блоке 5.

20 Блоки 3 и 4 реализуют оценки текущих направления α_i^* (известным способом, например, по Патенту РФ №2623831) и дальности D_i^* (предлагаемым способом), соответственно, путем измерения отклонений координат источника излучения $\delta_{\alpha i}, \delta_{r i}$ от координат виртуальной опорной точки $R_{\text{фопи}}$. Для этого в эти блоки поступают измерения ВСПМ $M_{\text{П}}$ пар антенн (Re и Im) из блока 2, коэффициенты компенсации разностей задержек сигнала в парах антенн $e_{\text{kmni}} = \exp(-j2\pi f_k \tau_{\text{mnRi}})$ и весовые коэффициенты $w_{\alpha mni} = \partial \tau_{\text{mnRi}} / \partial \alpha$ и $w_{r mni} = \partial \tau_{\text{mnRi}}(\alpha_{\text{опи}}, r_{\text{опи}}) / \partial r$.

Пример реализации блока 4 измерения отклонения $\delta_{r i}$ дальности ОТ от искомой и 35 получения оценки координаты D_i^* показан на фиг. 4, где: 4.1 - модуль суммирования по частоте мнимых элементов ВСПМ для каждой пары антенн с умножением на h_k, f_k и e_{kmnij} (здесь и далее в скобках указан блок или модуль из которого поступают данные или куда отправляются), результаты - величины S_{mni} для всех $M_{\text{П}}$ пар антенн поступают 40 в модуль 4.2 - модуль суммирования по индексу m с весовым коэффициентом $w_{\alpha mni}$, получая величине s_i , пропорциональные оцениваемому отклонению $\delta_{r i}$. 4.3 - модуль суммирования по частоте вещественных элементов ВСПМ для каждой пары антенн с умножением на h_k, f_k^2 и e_{kmnij} . 4.4 - модуль суммирования по индексу m с весовым коэффициентом $w_{r mni}^2$ - получение нормирующей величины g_i . 4.5 - модуль оценки отклонения $\delta_{\alpha ij}$ путем нормирования s_i на g_i . 4.6 - малое осреднение оценки отклонения

по i. 4.7 - оценка направления путем корректировки опорной точки на величину отклонения.

В блоке 5 (программируемый компьютер) выполняется динамическое сглаживание малоосредненных оценок координат α_i^* и D_i^* ; объема I каждая, с основным осреднением оценок за заданное время T_n (J циклов малого осреднения) и определением их производных для прогноза ОТ на следующий шаг.

Блок 6 (программируемые компьютер, контроллер) обеспечивает вычислительные операции для всех блоков меж-антенной пространственно-временной обработки,

С помощью рассмотренного устройства предложенный способ выполняется следующим образом. Наблюдатель с пульта управления назначает сектор углов и интервал дальностей наблюдения и на индикаторе обзора следит за появлением сигнальных отметок (СО) источников излучения. Корректирует параметры предварительной обработки, если это необходимо: усиление, границы частотного диапазона, частоту дискретизации, параметры выборки БПФ - $N_{дпф}$, параметры малого и динамического осреднения J, I и пр. Выбрав СО для определения точных координат и сопровождения, назначает нижнюю границу интервала дальностей $D_{фн}$, имея в виду, что чем меньше $D_{фн}$, тем острее главный максимум отклика и, следовательно больше крутизна ДХ и выше точность определения дальности, кроме того, в процессе наблюдения дальность до источника не должна становиться меньше $D_{фн}$, т.к. в области $D_S < D_{фн}$ некоторые вычисления некорректны (отрицательное число под корнем).

По сигналу с пульта начинается определение точных координат и сопровождение.

На шкалах индикатора визиром считываются координаты СО α_0^* , D_0^* и назначаются первой опорной точкой (ОТ): $D_{оп}(t_0) = D_0^*$, $\alpha_{оп}(t_0) = \alpha_0^*$, после чего включаются в действие все блоки обработки согласно схемам рисунков фиг. 3 и фиг. 4.

Показать работоспособность и преимущества предлагаемого способа удобнее всего на численном примере, используя графики дискриминационных характеристик заданной приемной системы, рассчитанные в диапазоне дальностей по способу прототипа и предлагаемым способом в равных условиях. Для расчетов принято: ПС с тремя антеннами, базовым размером $V_{ПС} = 191.5 \cdot \lambda_{ср}$ м, где $\lambda_{ср}$ - длина волны на средней частоте диапазона приема, скорость звука $c = 1500$ м/с. Интересующий наблюдателя интервал дальностей $D = (1,0 - 20,0)$ км. Дальность до нижней границы интервала виртуальной фокусировки $D_{фн} = r_{фн} = 1.0$ км, как показано на рисунке фиг. 2. На графиках фиг. 5 представлены дискриминационные характеристики отклонения дальности от ее опорного значения $D_{оп}$, (ДХД), измеряемые по текущей i-той выборке БПФ, рассчитанные известным способом (прототип, фиг 5а) и предлагаемым (фиг 5б) для фактического расположения источника излучения на дальностях $D_S = (1, 2, 3, 5, 10$ и $20)$ км. На горизонтальной оси расположены значения отклонений $(D - D_{оп})$ от опорной точки $(D = D_{оп})$ в метрах. На вертикальной оси - средние (по времени) выходные значения

дискриминаторов $\overline{z(D - D_{оп}, \alpha = \alpha_{оп})}$, для удобства и наглядности отнесенные к СКО флуктуаций этих значений $\sigma_z(\alpha = \alpha_{оп}, D = D_{оп})$ при некотором заданном отношении сигнал/помеха на антеннах ПС. Конкретное значение уровня помехи в нашем рассмотрении не существенно. Методика таких расчетов описана в работе [Гампер Л.Е. Критерии

оценки дальности действия пассивной гидролокации с разнесенными антеннами // НТС «Гидроакустика», вып. 11. СПб, 2010. С. 50-60.]. Она удобна тем, что значение графика z является по существу величиной выходного отношения сигнал/помеха дискриминации при рассогласовании ($D-D_{оп}$). Крутизна квазилинейного, рабочего участка ДХ

5 $\eta = \partial z / \partial (D - D_{оп}) \Big|_{D=D_{оп}}$ определяет точность измерения дальности пассивным гидролокатором. На графиках фиг. 5а видно, что при всех дальностях ДХ не антисимметрична и ее крутизна в точке $D=D_{оп}$ значительно уменьшается с увеличением фактической дальности до источника излучения. На графиках фиг. 5б крутизна ДХ в
10 точке $D=D_{оп}$ практически постоянна, а ее разброс (менее 0.25%) определяется незначительным расхождением на краях рабочего квазилинейного участка. Величины отношений крутизны ДХ при предлагаемом, нелинейном $\eta_{нс}$ и известном способе $\eta_{трс}$, на дальностях до источника излучения от 1.0 до 20.0 км, приведены ниже:

15

D_s , км	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0	20.0
$\eta_{нс}/\eta_{трс}$, раз	1.0	3.8	8.6	23.9	95.9	383.8

Значения таблицы во второй строке равны уменьшению среднеквадратической погрешности (СКО) определения дальности предлагаемым способом $\sigma_{Днс}$ по сравнению
20 с известным способом $\sigma_{Дтрс}$ на дальностях до источника излучения от 1.0 до 20.0 км. Следует отметить, что применение предлагаемого способа не связано с каким-либо ухудшением энергетических параметров обработки сигналов по сравнению с прототипом, т.к. как в первом, так и во втором случае выходной уровень дискриминации
25 одинаково определяется суммой сфазированных попарных корреляций сигналов антенн ПС. Параметры и пространственные характеристики отклика по направлениям при использовании предлагаемого способа не меняются.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения дальности до движущегося источника излучения пассивным
30 гидролокатором, содержащий прием сигналов M антеннами, $M \geq 3$, предварительную обработку, включающую усиление, фильтрацию с частотной характеристикой h_k , синхронную дискретизацию, цифровое преобразование, циклическое дискретное преобразование (ДПФ) в полосе приема $f_n \leq f_k \leq f_v$ (преобразование Фурье), средства
35 обзора в заданном секторе наблюдения и интервале дальностей, определение координат обнаруженной сигнальной отметки на индикаторе обзора α_n , D_n , которые на момент начала работы средств точного определения координат и сопровождения используют как опорную точку (ОТ) с координатами $D_{оп}(t_0) = D_n$, $\alpha_{оп}(t_0) = \alpha_n$, а для определения и
40 сопровождения текущего направления на движущийся источник излучения $\alpha_s^*(t)$ фазируют каждую m -ю антенну в направлении от ее центра на ОТ и на каждом i -м цикле ДПФ измеряют комплексные попарные взаимные спектры плотности мощности (ПВСПМ) сигналов пар антенн приемной системы, используют дискриминацию текущих отклонений направления от опорной точки $\alpha_{опi}$ и известные методы динамического
45 сглаживания последовательности оценок $\alpha_{si}^*(t_i)$, отличающийся тем, что для определения текущего значения дальности пассивным гидролокатором на каждом i -м

цикле ДПФ используют дискриминацию отклонения ее опорного значения $D_{опi}$ от искомого истинного D_{Si} , применяя при этом нелинейную шкалу дальностей r_{ϕ} до виртуальных точек фокусировки приемной системы $R_{\phi i}$ с координатами $\langle \alpha_{опi}, r_{\phi} \rangle$, для этого на линейной шкале D назначают заранее нижнюю границу интервала дальностей $D_{\phi n}$, в котором предположительно будет перемещаться источник излучения в процессе наблюдения и сопровождения: $D \geq D_{\phi n}$, на каждом очередном i -м цикле ДПФ назначают в нем опорную виртуальную точку фокусировки приемной системы $R_{\phi i}$ с координатами $\langle \alpha_{опi}, r_{опi} \rangle$, таким образом, что направление на $R_{\phi i}$ совпадает с $\alpha_{опi}$, а дальность $r_{опi}$ связана с $D_{опi}$ нелинейной зависимостью: $r_{i i i} = D_{i i i}^{-1} \cdot \gamma_{\phi}$, где γ_{ϕ} - масштабный коэффициент, равный квадрату нижней границы $D_{\phi n}$: $\gamma_{\phi} = D_{\phi n}^2$, и определяют величину и знак отклонения δ_{ri}^* текущего опорного значения $r_{опi}$ от искомого значения дальности до виртуального источника r_{Si} , а текущую оценку фактической дальности на i -м цикле ДПФ определяют как $D_{опi}^* = D_{опi} - \delta_{ri}^*$ и подвергают последующему динамическому осреднению известными методами определения параметров последовательных измерений и прогноза их значений на следующие циклы измерений.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что для определения величины и знака отклонения δ_{ri}^* текущего опорного значения $r_{опi}$ от искомого значения дальности до виртуального источника $r_{Si} = D_{Si}^{-1} \cdot \gamma_{\phi}$ используют дискриминацию отклонения дальности, для чего рассчитывают разность времен распространения сигнала t_{mRi} ($m, n=1, \dots, M$) из виртуальной точки $R_{опi}$ к центрам O_m, O_n каждой mn -й пары антенн $\tau_{mnRi} = t_{mRi} - t_{nRi}$, по формулам тригонометрии, используя скорость звука в среде c , а также определяют весовые коэффициенты, равные производной по r разности времен распространения $\tau_{mRi}(\alpha_{опi}, r_{опi})$, т.е. $w_{Rmni} = \partial \tau_{mni}(\alpha_{опi}, r_{опi}) / \partial r \Big|_{r=r_{опi}}$, суммируют по частоте f_k мнимые части ПВСПМ каждой mn -й пары антенн в полосе приема $[f_n, f_b]$ с умножением каждого слагаемого на коэффициент частотной характеристики h_k , на частоту f_k и на коэффициент $e_{kmni} = \exp(-j2\pi f_k \tau_{mnRi})$ компенсации разности времен распространения сигнала от опорной виртуальной точки $R_{\phi i}$ к центрам каждой mn -й пары антенн, в результате получают для каждой mn -й пары суммарные величины C_{mni} i -го цикла ДПФ, затем суммируют по частоте f_k вещественные части ВСПМ с умножением каждого слагаемого на h_k , на коэффициент компенсации e_{kmni} и на квадрат частоты f_k^2 , получая для каждой пары суммарную величину G_{mni} , затем суммируют по индексу mn величины C_{mnt} с весовыми коэффициентами w_{mnRj} , получая величину c_i , которую делят на сумму по индексу mn величин G_{mnt} с тем же весовым коэффициентом

в квадрате w_{mnRi}^2 , получая величину g_i , и определяют отклонение $\delta_{ri}^* = c_i/g_i$,

выполняют осреднение оценок отклонения δ_{ri}^* по $i=1, 2, \dots, I$ циклам ДПФ, получая

5

малоосредненную оценку отклонения δ_{rj}^* , а текущую оценку фактической дальности

на i -м цикле ДПФ определяют как $D_{опi}^* = D_{опi} - \delta_{ri}^*$.

10

15

20

25

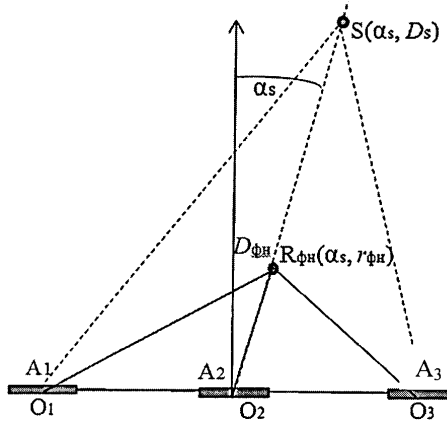
30

35

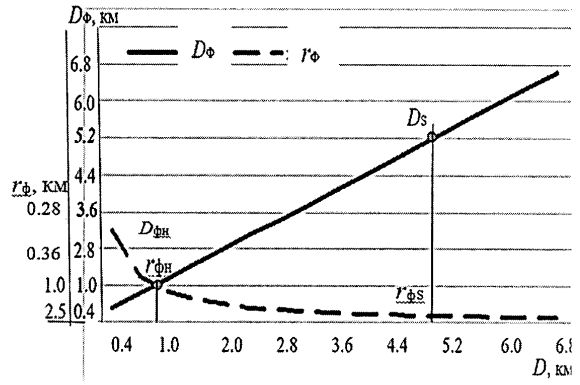
40

45

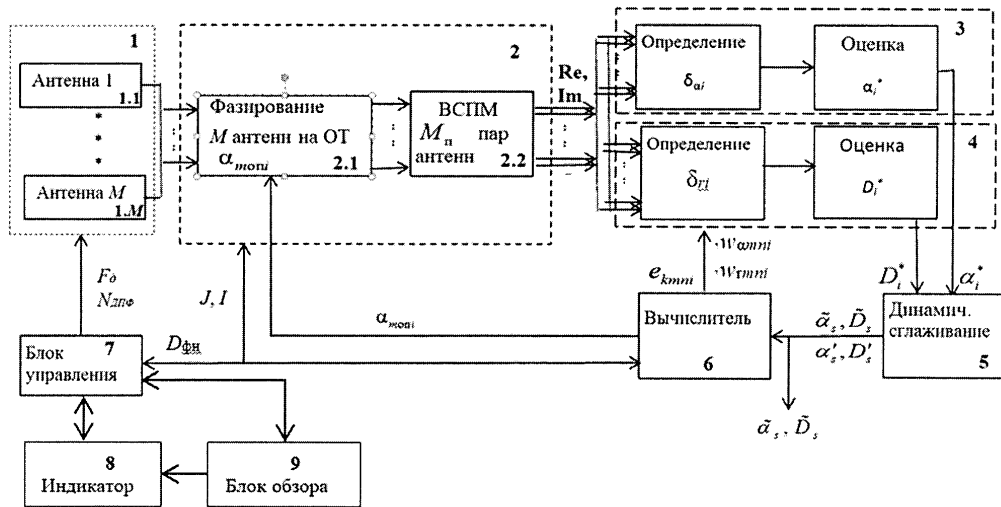
1



Фиг. 1

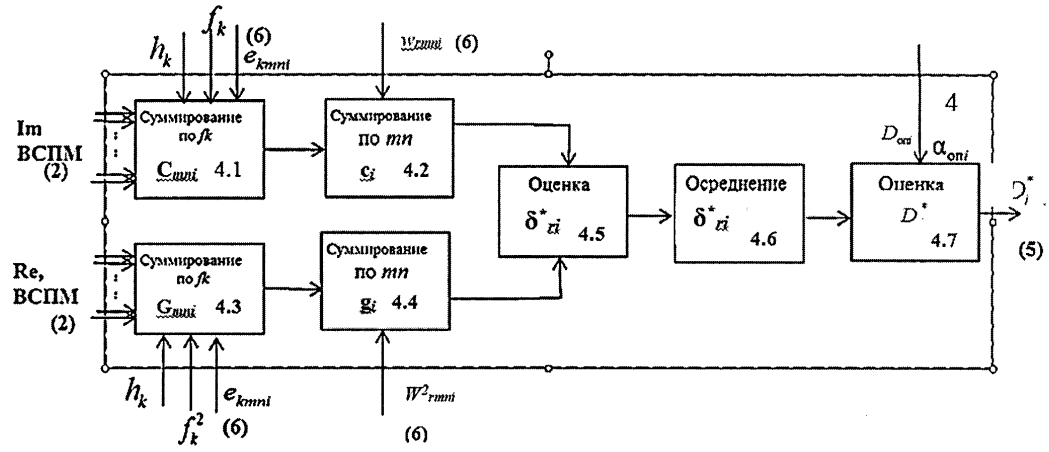


Фиг. 2



Фиг. 3

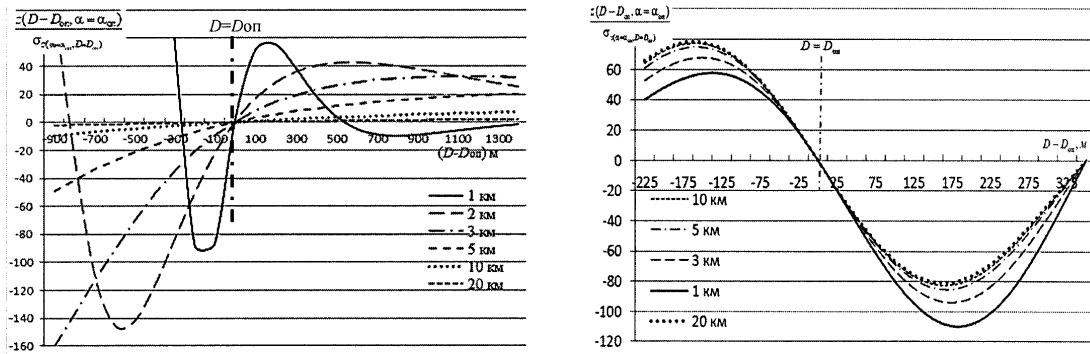
2



Фиг. 4

а

б



Фиг. 5