

УДК 534.222 : 629.127.4

Р.Н. Алифанов¹, И.А. Алифанова¹, С.В. Шостак², П.А. Стародубцев²¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б²Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия имени адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал, г. Владивосток), 690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6**РАСЧЕТ ДЕКАРТОВЫХ КООРДИНАТ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ
ПО КРИВИЗНЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИНЯТОГО СИГНАЛА**

Современные технологические решения пространственно-временной обработки принимаемых сигналов имеют массу трудностей, ограничений и приближений. Существенно значимыми являются инструментальные приближения, связанные с приведением волнового фронта принимаемого сигнала к прямолинейному состоянию. Они ограничивают возможность определения дальности действия измерительных гидроакустических систем, улучшение их разрешающей способности при наблюдении за окружающей обстановкой. Увеличение габаритов антенн приводит к тому, что пренебрегать кривизной волнового фронта в пределах зоны обнаружения сигнала многопозиционной приемной антенны становится невозможным. Это требует дополнительных теоретических исследований, позволяющих решить проблему учета кривизны волнового фронта принимаемых сигналов многопозиционными приемными антеннами. Измерительные системы, стоящие на кораблях, кривизну волнового фронта сигнала используют для улучшения качественных показателей. Опыт эксплуатации таких измерительных систем показывает, что она сильно проявляется при малых дальностях до наблюдаемого объекта как в случае ближней локации, так и при больших габаритных размерах приемной антенной системы, или систем разнесенного пассивного радиолокационного приема. В таких измерительных системах кривизна волнового фронта является дополнительным информационным параметром, характеризующим пространственно-временное состояние сигнала. Соответственно, использование кривизны волнового фронта сигнала, принимаемого измерительной системой, позволяет производить измерения детерминированной дальности и направления на удаленный объект.

Ключевые слова: кривизна волнового фронта, волновое поле, плоский фронт волны, пространственные координаты.

**R.N. Alifanov, I.A. Alifanova, S.V. Shostak, P.A. Starodubtcev
THE CALCULATION OF THE CARTESIAN COORDINATES
OF THE OFFSHORE FACILITIES IN THE CURVATURE
OF THE WAVEFRONT OF THE RECEIVED SIGNAL**

Modern technological solutions spatio-temporal processing of the received signals have a lot of difficulties, limitations and approximations. Essentially important are instrumental approach associated with bringing the wavefront of the received signal to the straight state. They limit the possibility of determining the range of the measurement sonar systems, improving their resolution by observing the surroundings. Increasing the size of antennas leads to the fact that neglect curvature of the wavefront within the area detection signal rocker receiving antenna becomes impossible. This requires additional theoretical studies to solve the problem of taking into account the curvature of the wavefront of the received signals multipositional receive antennas. Measuring the system on ships, the curvature of the wavefront of the signal used for the improvement of quality indicators. Experience in the operation of such measuring systems shows she pronounced at small distances to the observed object, as in the case of short-range location, and in large dimensions receiving antenna system, or systems spaced passive radar reception. In such systems, measuring the curvature of the wavefront is additional information parameter characterizing the space-time signal status. Accordingly, the use of the wavefront curvature of the signal received by the measuring system enables measurements determined distance and direction to a remote object.

Key words: curvature of the wave front, the wave field, a plane wave front, the spatial coordinates.

Расчет декартовых координат морских объектов по кривизне волнового фронта принятого сигнала

Измерительные радиолокационные или гидроакустические системы получают данные об удаленных морских объектах путем анализа характеристик волновых полей, которые создаются ими в результате собственного излучения или отражения от них зондирующих сигналов.

Структура и параметры принятого сигнала от волнового поля в области, где осуществляется такой анализ, зависят от положения подводного объекта относительно этой области и от его характеристик. Поэтому данное волновое поле несет практически всю информацию об его источнике.

Однако для получения данных о морском объекте используется не все волновое поле, излучаемое им, а только та его часть, которая попадает на приемную антенну измерительной гидроакустической системы. Воздействуя на элементы антенны, волновое поле образует пространственно-временной сигнал, который обрабатывается гидроакустической системой.

Основной задачей пространственно-временной обработки сигналов измерительной гидроакустической системой является анализ результирующего волнового поля для определения положения наблюдаемого подводного объекта, других его энергетических и пространственных характеристик: дальности и направления на подводный объект. Принципы построения измерительной гидроакустической системы и методы анализа их качества работы определяются существующими многочисленными теориями пространственно-временной обработки сигналов [1, 2]. Основные положения этих теорий позволяют проводить синтез и анализ пространственно-временных соотношений между габаритными размерами области наблюдения измерительной гидроакустической системой, т.е. L – областью «раскрыва» приемной антенны и R – «радиусом-вектором», определяющим положение источника сигнала.

При этом имеемые в теории и практике пространственно-временной обработки сигналов результаты получены, в основном, для простейшего состояния работы измерительной гидроакустической системы, когда принимаемый волновой фронт считается практически плоским в пределах L приемной антенны [1].

В то же время стремление разработчиков измерительных гидроакустических систем к увеличению их дальности действия, повышению разрешающей способности при наблюдении за подводными объектами и связанная с ними тенденция к увеличению размеров антенн приводит к тому, что в ряде случаев пренебрегать кривизной волнового фронта в пределах L приемной антенны практически невозможно.

Это, в первую очередь, относится к мультистатическим (многопозиционным) системам разнесенного приема сигналов от подводных объектов, так как для них большая часть всей рабочей области измерительной гидроакустической системы может находиться ближе границы дальней зоны, определяемой формулой $R_{д.з.} = 2L^2 / \lambda$, где λ – длина волны анализируемого сигнала [1, 2]. В таких мультистатических системах особенности, связанные с искривлением волнового фронта сигнала, проявляются особенно остро [2].

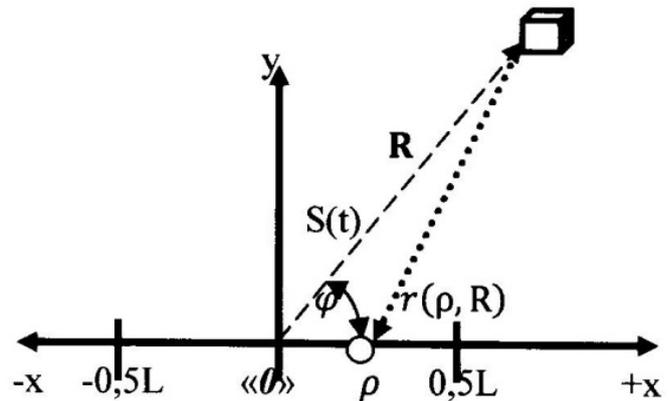
По этой причине математические выражения пространственно-временной обработки [1], полученные для гидроакустических волн с плоским волновым фронтом, в ряде случаев, особенно для мультистатической системы, оказываются недостаточно аргументированными и требуют дополнительного математического решения, что и будет предметом дальнейших рассуждений авторов статьи. А разработка физических основ и теоретического обоснования новых подходов определения пространственных координат объекта по кривизне волнового фронта в измерительной гидроакустической системе имеет важное для современной гидроакустики прикладное значение.

Ниже рассмотрим новое математическое решение для определения пространственных координат подводного объекта по кривизне волнового фронта в измерительной гидроакустической системе на основе анализа мгновенной частоты, формируемой на апертуре антенны гармоническим эхосигналом [3].

Примем в качестве упрощенной модели предлагаемого решения «точечную модель» на основе изотропно излучающего подводного объекта, который создает в однородной безграничной среде сферическую волну. Такая модель является основой для анализа сигналов реальных морских объектов (соответственно подводных объектов), так как эти объекты во многих случаях хорошо описываются моделью в виде некоторого набора «блестящих точек» [4, 5]. В то же время соотношения, справедливые для точечного объекта, применимы и для малоразмерных объектов, если их величины много меньше элемента разрешения системы пространственно-временной обработки сигналов [1, 2, 6].

Для теоретического описания процесса формирования волновых полей антенной системой построим графическую модель, состоящую одновременно из декартовой (x, y) и полярной (R, φ) систем координат (рисунок), где R – «радиус-вектор», определяющий положение источника сигнала; L – область задания функции «раскрыва» приемной антенн; $r, (\rho, R)$ – радиус некоторой точки ρ приема гармонического эхосигнала в области L .

Расчет декартовых координат морских объектов по кривизне волнового фронта принятого сигнала
The calculation of the Cartesian coordinates of the offshore facilities in the curvature of the wavefront of the received signal



Пусть из начала координат «0» такой графической модели излучается зондирующий сигнал $S(t)$ вида

$$S(t) = \text{Re}\{S_3(t)\} = A \text{Re}\{S_0(t)\} = A \text{Re}\{\exp(j2\pi f_0 t)\}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, пропорциональный коэффициенту усиления излучающей антенны; $S_3(t)$ – комплексный зондирующий сигнал; $S_0(t)$ – комплексный сигнал единичной мощности; f_0 – несущая частота излученного сигнала.

Как было определено выше, рассматриваемый малоразмерный объект является изотропно излучающим подводным объектом. Поэтому при его эквивалентном радиусе поле давления в обозначенной нами ранее некоторой точке ρ «раскрыва» L приемной антенны будет определяться следующим математическим выражением (2):

$$S(t, \rho, R) = \frac{B}{r(\rho, R)} \text{Re}\left\{S_0\left(t - \frac{R + r(\rho, R)}{c}\right) \exp(j\Psi)\right\}, \quad (2)$$

где $B = \sqrt{R_0}$ – постоянный множитель; c – скорость звукового сигнала в воде; $\frac{B}{r(\rho, R)}$ – амплитудный множитель; Ψ – изменение (или набег) фазы гидроакустической волны при отражении от ПО.

Если левую и правую части постоянного множителя B умножить на функцию $\exp(j\Psi)$, то полученное выражение $B\exp(j\Psi) = \sqrt{R_0} \exp(j\Psi)$ можно интерпретировать как «комплексный коэффициент отражения сигнала от подводного объекта». Тогда из (2) следует, что поле на «раскрыве» антенны несет информацию о местоположении объекта, определяемом вектором R или полярными координатами R, φ .

Пронормировав амплитуды принятых гидроакустических сигналов в различных точках «раскрыва» антенны (от $-0,5L$ до $+0,5L$) по отношению к амплитуде сигнала в точке начала координат «0», амплитудный множитель можно записать в виде

$$\frac{B}{Rr(\rho, R)} = \frac{aR}{r(\rho, R)}, \tag{3}$$

где a – значение этого множителя в начале координат «0» при $r = R$.

Используя выражения (1), (3) и обозначив $\hat{a} = a \exp(j\Psi)$, получим поле, создаваемое малоподвижным изотропно излучающим точечным подводным объектом:

$$S(t, \rho, R) = \text{Re} \left\{ \frac{\hat{a}R}{r(\rho, R)} S_0 [t - (R + r(\rho, R))/c] = \text{Re} \left\{ \frac{aR}{r(\rho, R)} \exp \left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R + r(\rho, R)}{c} \right) + j\Psi \right] \right\} \right\}. \tag{4}$$

В случае пассивной локации источников излучения за начало координат принимается фазовый или геометрический центр приемной антенны. Тогда поле источника в точке ρ приемной антенны будет

$$S(t, \rho, R) = \text{Re} \left\{ \frac{c_1}{r(\rho, R)} U(t - (r(\rho, R) - R)/c) = \exp [j2\pi f_0 (t - r(\rho, R) - R/c)] \right\}, \tag{5}$$

где $\text{Re}[U(t)\exp(j2\pi f_0 t)]$ – сигнал, излучаемый источником; $U(t)$ – комплексная огибающая сигнала источника; c_1 – амплитудный множитель, который, как правило, неизвестен.

Как видно из [2, 7, 8], свойства обрабатываемого пространственно-временного сигнала и его математическое описание зависят от вида и степени кривизны волнового фронта в пределах «раскрыва» антенны.

Если положение объекта задано в полярной системе координат, то расстояние $r(\rho, R)$ рассчитывается по следующей математической формуле:

$$r(\rho, R) = (R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos \varphi)^{1/2}. \tag{6}$$

Из (6) можно получить приближенное математическое выражение, обуславливающее значения $r(\rho, R)$ в зоне Френеля, для линейной антенны путем его разложения в степенной ряд. Затем, ограничиваясь только членами второго порядка, как представлено в [2], $r(\rho, R)$ можно описать следующим образом:

$$r(\rho, R) = R - \rho \cos \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi / 2R. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получим гармонический пространственно-временной сигнал следующего вида:

$$\begin{aligned} S(t, \rho, R) &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{\bar{a}R}{r(\rho, R)} S_0 \left(t - \frac{2}{c} (2R - \rho \cos \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi / 2R) \right) \right\} = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{aR}{r(\rho, R)} \exp \left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{1}{c} (2R - \rho \cos \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi / 2R) \right) + j\Psi \right] \right\} =, \quad (8) \\ &\operatorname{Re} \left\{ \frac{aR}{r(\rho, R)} \exp [j2\pi f_0 t + j\Psi] \exp \left[-jk_0 (2R - \rho \cos \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi / 2R) \right] \right\}, \end{aligned}$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{c} f_0$ – волновое число.

Из (8) видно, что данный сигнал представляет собой факторизуемую функцию времени и координат подводного объекта, т.е. разлагается в произведение функции времени и функции координат. Поэтому возможно проведение обработки принятого гармонического пространственно-временного сигнала отдельно по временной координате и отдельно по пространственной координате.

Для обоснования процесса обработки данного сигнала в качестве примера по пространственной координате и подтверждения смысла всего вывода в целом возьмем антенную систему в виде заполненной линейной решетки длиной L , ориентированную вдоль оси x и проходящую через точку «0» (см. рисунок). Пространственная фаза такого сигнала вдоль оси x на антенне будет иметь вид

$$\Theta(x) = -k_0 \left(2R - x \cos \varphi + \frac{x^2 \sin^2 \varphi}{2R} \right) = k_0 x \cos \varphi - \frac{k_0 \sin^2 \varphi}{2R} x^2 - \Theta_0, \quad (9)$$

где $\Theta_0 = 2k_0 R$ – начальная фаза принятого сигнала.

Из (9) достаточно просто можно получить мгновенную пространственную частоту сигнала, которая в том случае определяется выражением [9]

$$\omega(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} = k_0 \cos \varphi - \frac{k_0}{R} x \sin^2 \varphi. \quad (10)$$

Для полной локализации источника колебаний в пространстве требуется рассчитать величины R и ω . Определение направления на источник φ производится путем обращения выражения (10) для $\omega(x)$ по x

$$\omega(-x) = k_0 \cos \varphi + \frac{k_0}{R} x \sin^2 \varphi. \quad (11)$$

Складывая выражения (10) и (11), приходим к соотношению

$$\cos \varphi = [\omega(x) + \omega(-x)] / 2k_0, \quad (12)$$

из которого направление на источник φ рассчитывается следующим образом:

$$\varphi = \arccos \left[\frac{\omega(x) + \omega(-x)}{2k_0} \right]. \quad (13)$$

Найдем теперь выражение для определения дальности до объекта. Для этого возьмем вторую производную по x от выражения (10)

$$\omega'(x) = \frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} = -\frac{k_0}{R} \sin^2 \varphi. \quad (14)$$

Тогда из формулы (14) следует, что дальность до объекта определяется математической формулой следующего вида:

$$R = -\frac{k_0 \sin^2 \varphi}{\omega'(x)} = -\frac{k_0}{\omega'(x)} [1 - \cos^2 \theta] = \frac{k_0}{\omega'(x)} (\cos^2 \theta - 1) = \frac{k_0}{\omega'(x)} \left[\left(\frac{\omega(x) + \omega(-x)}{2k_0} \right) - 1 \right]. \quad (15)$$

Такой подход к определению пространственных координат подводного объекта по кривизне волнового фронта принятых измерительной гидроакустической системой сигналов показывает, что кроме отрицательных последствий, накладываемых на их работу, ее учет имеет и положительные моменты.

Кривизну волнового фронта сигнала можно использовать для улучшения качественных показателей технических систем, если она в пределах «раскрыва» антенны хорошо выражена. Это сильно проявляется при малых дальностях до наблюдаемого объекта как в случае ближней локации, так и при больших габаритных размерах приемной антенной системы (для случая с мультистатической системой) или систем разнесенного пассивного радиолокационного приема. В этих технических системах кривизна волнового фронта является дополнительным информационным параметром, характеризующим пространственно-временное состояние сигнала. Соответственно использование кривизны волнового фронта сигнала, принимаемого технической системой, позволяет производить измерения детерминированной дальности и направления на удаленный объект.

В настоящее время известно, что российскими учеными разработана и изготовлена радиолокационная станция, в которой используется монохроматический сигнал при измерении дальности до объекта по кривизне волнового фронта отраженного сигнала без использования информации о времени его запаздывания [10].

Не секрет также, что в гидролокаторах бокового обзора марки «Sidescan sonar» фирмы Klein Association Inc (США) для определения дальности до морского объекта используется метод динамической фокусировки в режиме приема эхосигналов. В этом методе путем вве-

дения фазового распределения по апертуре фокусное расстояние антенны изменяется во времени и равно текущему значению дальности, с которой в данный момент приходит сигнал. Пространственная разрешающая способность при этом повышается благодаря тому, что сфокусированная антенна воспринимает эхосигнал не от всей освещенной зондирующим импульсом площади, а только от ее более узкой части, ограниченной фокусным пятном.

Основным достоинством предложенных технологических решений является то, что в них проводится обработка сигналов со сферическим волновым фронтом.

Есть также возможность подавления внешних полей за счет пространственной селекции по дальности. Это хорошо в случаях, когда наблюдаемые морские объекты и источники помех находятся на одном пеленге и их разрешение по угловым координатам затруднительно [2].

Список литературы

1. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. – Л.: Судостроение, 1988. – 264 с.
2. Булатов В.Н. Спектральная характеристика для обобщенного сигнала с динамическими параметрами // Анализ структур электронной и вычислительной техники: межвуз. сб. науч. тр. – Оренбург: ОГТУ, 1995. – С. 25–30.
3. Антенны. Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Антенная секция: сб. – М.: Связь, 1979. – Вып. 27.
4. Долгих В.Н., Бойко К.П. Отклик случайной антенны на воздействия случайного сигнала и помехи // Основы статистической теории направленности дискретных приемных антенн. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2000. – С. 96–102.
5. Гусев В.Г., Лоскутова Г.В. Об использовании алгоритма двумерного быстрого преобразования Фурье для обработки информации от линейной антенной решетки // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 12. – С. 2362–2366.
6. Пространственно-временная обработка сигналов / под ред. И.Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
7. Бьерне Л. Неоднородности и нестабильность распространения звука под водой // Подводная акустика и обработка сигналов / под ред. Л. Бьерне; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – С. 32–42.
8. Стародубцев П.А., Шостак С.В., Богданов В.И. Об одном свойстве двумерного преобразования Фурье // 38 Всерос. межвуз. науч.-техн. конф.: сб. докл. – Владивосток: ТОВВМУ, 1995. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 193–197.
9. Иидзука К., Огура Х., ЯньДж.Л., Ван-Кхай Н. // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 10. – С. 45–58.
10. Бурдик Вильям С. Анализ гидроакустических систем. – Л.: Судостроение, 1988. – 392 с.

Сведения об авторах: Алифанов Роман Николаевич, кандидат технических наук, e-mail: gidra_518@mail.ru;
Алифанова Ирина Анатольевна, e-mail: shira_83@mail.ru;
Шостак Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент;
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: spa1958@mail.ru.