

УДК 681.883.48

© Е.Г. Борисов, к.т.н., доцент; О.С. Голод, к.т.н., доцент

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)**МНОГОПОЗИЦИОННАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ПОДВОДНОЙ НАВИГАЦИИ**

В статье рассматривается вариант решения задачи определения координат подводного объекта активной многопозиционной гидроакустической системой, реализующей кооперативную обработку сигналов.

**НАВИГАЦИЯ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА, МНОГОПОЗИЦИОННАЯ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, КООПЕРАТИВНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

В ряде задач обеспечения местоопределения подводных объектов (водолазов, мобильных подводных роботов, глубоководных научно-исследовательских аппаратов и т.д.) используются системы, состоящие из нескольких навигационных баз из множества плавучих маяков [1, 2]. Такие системы по своему физическому смыслу представляют собой многопозиционные активные системы, основные принципы построения которых рассмотрены в работах [3-6].

Рассмотрим вариант решения определения пространственных координат и скорости перемещения объектов, расположенных под водой, многопозиционной активной гидроакустической системой (МПАГС) (рис. 1).

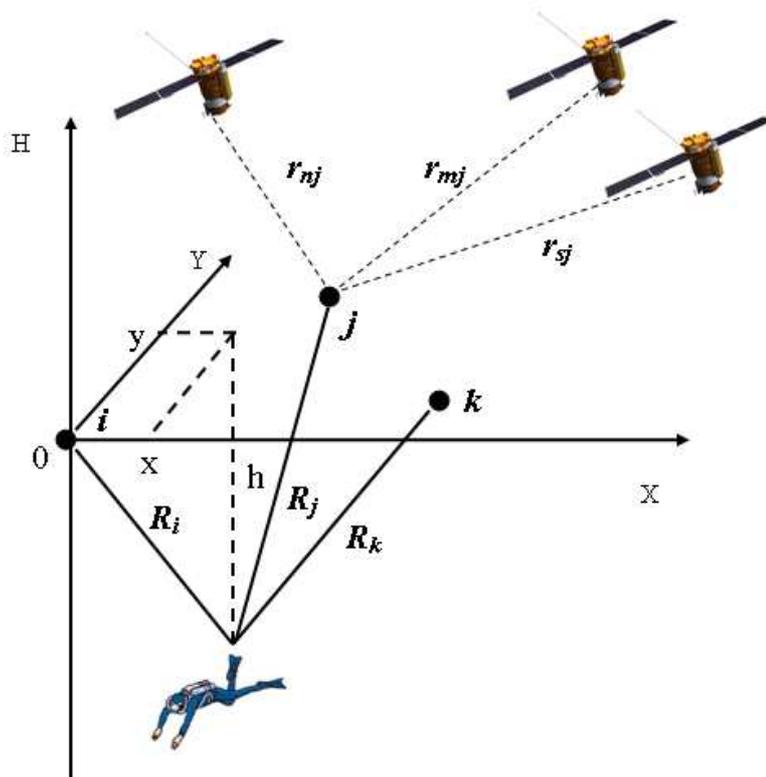


Рис. 1 – Геометрическая интерпретация определения координат подводных объектов

В состав системы входят дрейфующие буи (i, j, k) , оснащенные аппаратурой приема сигналов спутниковых навигационных систем (СНС), что позволяет определять их пространственные координаты.

Использование разностно-дальномерного метода СНС для определения координат объектов рассмотрено, например, в работе [7].

После определения прямоугольных координат дрейфующих буюв по данным СНС производится местоопределение подводного объекта дальномерным способом (при условии совмещения начала координат с i -м буювом):

$$R_i = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2},$$

$$R_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + h^2}, \quad (1)$$

$$R_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + h^2},$$

где: R_i, R_j, R_k - дальности до объекта относительно каждого из буювов;

x_j, y_j, x_k, y_k - прямоугольные координаты j -го и k -го буювов.

Очевидно, что точность определения прямоугольных координат объекта зависит от точности измерения наклонных дальностей.

Каждый из буювов излучает сигнал на собственной несущей частоте и принимает отраженные объектом сигналы, формируя, таким образом, три оценки дальности до объекта. Кроме того, каждые два других дрейфующих буюва принимают переотраженные объектом сигналы, излученные третьим, формируя, таким образом, шесть оценок суммарных дальностей. Такой подход и реализует процедуру кооперативной обработки приема отраженных сигналов, который заключается в том, что все приемные позиции способны принимать отраженные сигналы от целей, облученных любой передающей позицией [3].

Под кооперативностью обработки измерительной информации в контексте настоящей статьи будем понимать поиск функционального преобразования над измеренными наклонными дальностями и суммарными расстояниями, измеренными на каждом из дрейфующих буювов, обеспечивающего минимум дисперсии ошибки оценок дальностей, полученных косвенными измерениями:

$$(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j, \tilde{R}_k) = \psi(\hat{R}_i, \hat{R}_j, \dots, \hat{R}_N, \hat{R}_{\Sigma ij}, \hat{R}_{\Sigma ji} \dots \hat{R}_{\Sigma(N-1)N}), \quad i, j = \overline{1, N}$$

где $\hat{R}_i, i = \overline{1, N}$ - наклонные дальности относительно i -й позиции;

$\hat{R}_{\Sigma ij}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j$ - суммарные дальности до объекта относительно i -й и j -й позиций;

N - количество позиций МПАГС;

знаком " \sim " обозначены результаты кооперативной обработки;

знаком " $\hat{}$ " - оценки параметров по результатам измерений на отдельных позициях.

Необходимо найти процедуру обработки координатной информации в системе N измерителей, которая при реализации кооперативной обработки позволяет повысить точность измерений дальности при обработке всех физически реализуемых независимых измерений наклонных и суммарных дальностей.

Реализация процедур излучения и приема сигналов при необходимом частотном разносе обеспечивается отдельным приемом сигналов на позициях на соответствующих частотах. Наличие независимых приемо-усилительных трактов и каскадов гетеродинирования позволяет считать измерения дальностей и сумм расстояний независимыми [8].

В работах [9, 10] показано, что при кооперативной обработке локационной информации оптимальная по критерию минимума среднеквадратической ошибки оценка координаты определяется формулой:

$$\hat{X} = (A^T \Lambda W A)^{-1} A^T \Lambda W U, \quad (2)$$

где: $W = \begin{vmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & w_N \end{vmatrix}$ – матрица весов оценок измерений;

$\Lambda = \text{diag} [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]$ – диагональная матрица размером $N \times N$, $i = \overline{1, N}$, учитывающая наличие или отсутствие соответствующих измерений;

$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & a_{NN} \end{vmatrix}$ – матрица коэффициентов при неизвестных;

$U^T = \|\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_N, \hat{R}_{\Sigma ij}, \hat{R}_{\Sigma ji}, \dots, \hat{R}_{\Sigma(N-1)N}\|$ – вектор измеренных параметров.

Представив измерения в рассматриваемой системе в виде:

$$\begin{cases} \tilde{R}_{ii} = 2 \cdot \hat{R}_i + 0 \cdot \hat{R}_j + 0 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{jj} = 0 \cdot \hat{R}_i + 2 \cdot \hat{R}_j + 0 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{kk} = 0 \cdot \hat{R}_i + 0 \cdot \hat{R}_j + 0 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma ij} = 1 \cdot \hat{R}_i + 1 \cdot \hat{R}_j + 0 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma ji} = 1 \cdot \hat{R}_i + 1 \cdot \hat{R}_j + 0 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma ik} = 1 \cdot \hat{R}_i + 0 \cdot \hat{R}_j + 1 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma ki} = 1 \cdot \hat{R}_i + 0 \cdot \hat{R}_j + 1 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma jk} = 0 \cdot \hat{R}_i + 1 \cdot \hat{R}_j + 1 \cdot \hat{R}_k; \\ \tilde{R}_{\Sigma kj} = 0 \cdot \hat{R}_i + 1 \cdot \hat{R}_j + 1 \cdot \hat{R}_k; \end{cases} \quad (3)$$

детализируем матрицы и векторы в (2) с учетом рассматриваемой задачи:

$$A^T = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$U^T = \left\| \hat{R}_{ii} \hat{R}_{jj} \hat{R}_{kk} \hat{R}_{\Sigma ij} \hat{R}_{\Sigma ji} \hat{R}_{\Sigma ik} \hat{R}_{\Sigma ki} \hat{R}_{\Sigma jk} \hat{R}_{\Sigma kj} \right\|; X^T = \left\| \tilde{R}_i, \tilde{R}_j, \tilde{R}_k \right\|. \quad (4)$$

Полагая наличие всех измерений, т.е. $\Lambda = \text{diag}[1,1,\dots,1]$ и значения весовой матрицы равными единице, подстановкой (4) в (2) получим:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_i &= \frac{5}{18} \hat{R}_{ii} - \frac{1}{18} \hat{R}_{jj} - \frac{1}{18} \hat{R}_{kk} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ij} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ji} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ik} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ki} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma jk} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma kj}, \\ \tilde{R}_j &= -\frac{1}{18} \hat{R}_{ii} + \frac{5}{18} \hat{R}_{jj} - \frac{1}{18} \hat{R}_{kk} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ij} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ji} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma ik} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma ki} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma jk} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma kj}, \\ \tilde{R}_k &= -\frac{1}{18} \hat{R}_{ii} - \frac{1}{18} \hat{R}_{jj} + \frac{5}{18} \hat{R}_{kk} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma ij} - \frac{1}{18} \hat{R}_{\Sigma ji} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ik} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma ki} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma jk} + \frac{1}{9} \hat{R}_{\Sigma kj}. \end{aligned} \quad (5)$$

В выражениях (5) дробные коэффициенты при измеренных значениях дальностей и сумм расстояний аналогичны коэффициентам при реализации процедур фильтрации траекторного сообщения, с той лишь разницей, что обработка для достижения заданной точности производится за один цикл измерений в системе. Это существенно сокращает время для достижения точности измерений.

Дисперсии ошибок определения дальностей при условии равноточных измерений наклонных дальностей и сумм расстояний определяются как:

$$\sigma_{Rci}^2 = \sigma_{Rcj}^2 = \sigma_{Rck}^2 = \text{diag} \left(A^T W A \right)^{-1} \sigma_R^2 = \text{diag} \frac{1}{32} \begin{vmatrix} \frac{5}{36} & -\frac{1}{36} & -\frac{1}{36} \\ -\frac{1}{36} & \frac{5}{36} & -\frac{1}{36} \\ -\frac{1}{36} & -\frac{1}{36} & \frac{5}{36} \end{vmatrix} \sigma_R^2, \quad (6)$$

откуда также следует, что среднеквадратическая ошибка определения наклонных дальностей равна $\sigma_{RC} = 0.373 \sigma_R$, что, по сути, означает увеличение точности определения дальности в 2.683 раза.

Во столько же раз увеличивается точность определения прямоугольных координат.

Пусть передающее устройство одного из буев генерирует монохроматическое колебание вида:

$$U_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (7)$$

где A_0 - амплитуда зондирующего сигнала;

$\omega_0 = 2\pi f_0$ - несущая частота;

φ_0 - начальная фаза колебания.

Принятый приемной антенной, например, первого буга переотраженный целью эхосигнал на выходе приемного тракта представим как:

$$U_{c1} = A_{01} \cos(\psi_1(t)), \quad (8)$$

где

$$\psi_1(t) = 2\pi f_0 t - f_0 \frac{\dot{R}_\Sigma}{c} t - 2\pi f_0 \frac{R_{\Sigma 0}}{c} + \phi_0 + \phi_{\text{отр}}, \quad (9)$$

$R_{\Sigma 0}$ - суммарная дальность передающая позиция – цель – приемная позиция на момент начала измерения;

\dot{R}_Σ - скорость изменения суммарной дальности;

$\phi_{\text{отр}}$ - скачок фазы при отражении от цели.

Устройство выделения достоверных отсчетов и отбраковки недостоверных содержит последовательно соединенные перемножитель (фазовый детектор), интегратор (ИНТ), пороговое устройство (ПУ) (рис. 2). В качестве опорного сигнала перемножителя используется выходное напряжение частоты ω_0 с выхода блока формирования фазированного опорного сигнала (БФОС), на вход которого поступает сигнал с выхода приемного канала.

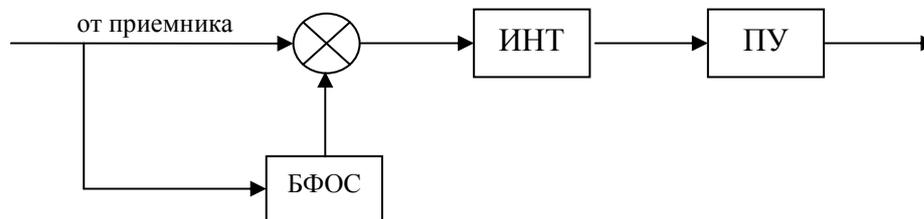


Рис. 2 - Структура обнаружителя

Этот блок выполняет следующие операции:

1. измерение фазового сдвига $\Delta\psi_1$ между эхосигналами $U_{c1}(t)$ и сигналом опорного генератора $U_{оп}(t)$;

2. сдвиг по фазе опорного сигнала $U_{оп}(t)$ на величину $\Delta\psi_1$ в дискретные моменты времени $t_i = nT$, где $n=0, 1, \dots, \infty$, T – период коррекции фазы опорного сигнала, при этом в моменты времени $t_i = nT$ сигналы $U_{c1}(t)$ и $U_{оп}(t)$ окажутся в фазе.

Таким образом, на опорном входе перемножителя коррелятора формируется напряжение (11):

$$U_{оп}(t) = A_{оп} \cos(\omega_0 t + \psi_{c1}(t_i)), \quad (10)$$

где $A_{оп}$ - амплитуда опорного напряжения коррелятора.

Примем, что фазирование осуществляется с периодом T , меньшим времени корреляции фазы полезного сигнала, тогда полезный сигнал на интервале T можно считать гармоническим колебанием и постоянная составляющая напряжения на выходе перемножителя определится соотношением:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{\phi Д1} &= \frac{1}{T} \int_0^T A_{C1} \cos(\omega_c t + \psi_{C1}(t)) A_{оп1} \cos(\omega_0 t + \psi_{C1}(t_i)) dt = \\ &= \frac{A_{C1} A_{оп1}}{2T} \left[\int_0^T \cos(2\pi F_{R\Sigma} t) dt + \int_0^T \cos(2\pi(f_0 + f_c)t + 2\psi_{C1}(t_i)) dt \right] = \\ &= \frac{A_{C1} A_{оп1}}{2T} \int_0^T \cos(2\pi F_{R\Sigma} t) dt.\end{aligned}$$

Поскольку период коррекции фазы T много больше периода сигнала, то можно считать, что $\int_0^T \cos(2\pi(f_c + f_0)t + 2\psi_{C1}(t_i)) dt \approx 0$, следовательно, получим:

$$U_{\phi Д1} = \frac{A_{C1} A_{оп1}}{2T} \frac{\sin(2\pi F_{R\Sigma} T)}{2\pi F_{R\Sigma} T} = k A_{C1} \frac{\sin(2\pi F_{R\Sigma} T)}{2\pi F_{R\Sigma} T}, \quad (11)$$

где $k = \frac{A_{оп}}{2}$.

Длительность периода фазирования T должна выбираться такой, чтобы при максимальной величине доплеровской частоты $F_{R\Sigma}$ функция $\sin x/x$ была близка к 1, тогда напряжения от помех, имеющих частоту, отличную от частоты f_0 , не будут создавать заметного напряжения на входе интегратора коррелятора вследствие малого значения функции $\sin x/x$ и вероятность ложных тревог уменьшится. Поскольку для детектирования сигнала в описываемом устройстве используется не квадратичный, а синхронный детектор, то вероятность правильного обнаружения эхосигнала увеличится, что в целом повысит эффективность системы и точность определения координат объекта.

Литература

1. Пат. 2032187 Российская Федерация G01S15/08 Гидроакустическая синхронная дальномерная навигационная система / Касаткин Б.А. Оpubл: 27.03.1995
2. Пат. на полезную модель 97539 Российская Федерация G01S5/24 Гидроакустическая система подводной навигации для водолазов / Самойлов А.В. Оpubл: 10.09.2010.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / Черняк В.С. - М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.
4. Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы / Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. - М.: Радио и связь, 1986. 264 с.

5. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех / Зайцев Д.В. - М.: Радиотехника, 2007. - 96 с.
6. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / Аверьянов В.Я. - Минск: Техника, 1978. - 148 с.
7. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ [Под. ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина]. – М.: ИПЖР, 1998. – 400 с.
8. Справочник по радиолокации / пер. с английского; под общ. ред. К. Н. Трофимова. - В 4 т. - М.: Сов. радио. Т 4. - 1978. - 376 с.
9. Борисов Е.Г. Получение максимально правдоподобных оценок координат целей при кооперативной обработке дальномерно – угломерной информации / Борисов Е.Г., Машков Г.М. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. - 2012. - Вып. 3. - С. 84 – 92.
10. Борисов Е.Г. Кооперативная обработка координатной информации / Борисов Е.Г. // Компоненты и технологии. – 2012. - №3. - С. 90 - 95

Стаття надійшла до редакції 05 листопада 2012 р. російською мовою

**© Є.Г. Борисов, О.С. Голод
БАГАТОПОЗИЦІЙНА ГІДРОАКУСТИЧНА СИСТЕМА
ПІДВОДНОЇ НАВІГАЦІЇ**

У статті розглядається варіант розв'язання завдання визначення координат підводного об'єкта активною багатопозиційною гідроакустичною системою, що реалізує кооперативну обробку сигналів.

**© Eugenie G. Borisov, Oleg S. Golod
MULTIPOSITION HYDROACOUSTICAL SYSTEM
OF UNDERWATER NAVIGATION**

In the article the solution to the problem of determining the coordinates of the underwater object multistation active sonar systems implement a joint processing of signals.