

## Ensayos

# La medición de la **posición de objetos subacuáticos** con precisión alta en condiciones reales del mar

### Resumen

En el presente artículo se considera el problema de medición de la posición de los objetos subacuáticos con precisión alta en condiciones reales del mar. Como un sistema medidor ha sido elegido un sistema de base corta superior (sistema BCS), el cual para la obtención de la posición del objeto, utiliza las mediciones de la distancia entre el punto de ubicación del sistema medidor y el punto de colocación del objeto subacuático con la determinación de la posición angular del objeto observado. Se apuntan los factores principales que provocan la aparición de errores de medición de la posición de los objetos subacuáticos por un sistema BCS básico con la antena receptora de tres elementos. En el artículo se propone aumentar el número de los elementos de la antena receptora del sistema BCS de tal manera que el aumento de los elementos forma las bases receptoras adicionales y entre ellas las bases receptoras colocadas en plano vertical. Se representa un algoritmo del cálculo de las coordenadas del objeto para el caso de inclinación arbitraria de la antena receptora provocada por la agitación del mar. Se representan los resultados de evaluación de la precisión instrumental del sistema con la antena receptora de tres y cinco elementos.

### Abstract

This article tackles the problem of highly precise measurements of the position of underwater objects in real sea conditions. As a measuring system, a higher type base system (BCS system) has been chosen which, in order to identify the position of the object, uses the measurements of the distance between the location of the measuring system and the location of the underwater object, by determining the angle position of the object under observation. The principal factors which spark off the appearance of measurement errors of the position of underwater objects are noted by means of a basic BCS system with a three element receiver antenna. This article proposes increasing the number of elements of the receiver antenna of the BCS system in such a way that this increase forms the additional receiver bases, and between them the receiver bases placed in a vertical plane. An algorithm to calculate the coordinates of the object is given in case of an arbitrary inclination of the receiver antenna caused by sea turbulence. The results of the evaluation of the instrumental precision of the system is shown for a receiver antenna of three and five elements.

### Abstrait

Dans le présent article est abordé le problème de la mesure de haute précision de la position d'objets sub-aquatiques dans des conditions réelles de mer. Comme système de mesure, on a choisi un système de base courte supérieure (système BCS), lequel utilise, pour l'obtention de la position de l'objet, les mesures de la distance entre le point d'emplacement du système mesureur et le point d'emplacement de l'objet sub-aquatique, par la détermination de la position angulaire de l'objet observé. On prend en note les principaux facteurs qui provoquent l'apparition d'erreurs de mesures de la position des objets sub-aquatiques par un système BCS basique doté d'une antenne réceptrice de 3 éléments. Dans l'article, on propose d'augmenter le nombre d'éléments de l'antenne réceptrice du système BCS de telle manière que l'augmentation des éléments forme les bases réceptrices additionnelles, et parmi celles-ci les bases réceptrices placées en plan vertical. On représente un algorithme du calcul des coordonnées de l'objet pour le cas de l'inclinaison arbitraire de l'antenne réceptrice provoquée par l'agitation de la mer. On représente les résultats de l'évaluation de la précision instrumentale du système avec l'antenne de 3 et 5 éléments.

\* Arkhipov Mikhail Alexandrovitch

## 1. Introducción

Prácticamente todos los tipos de trabajos en el mar, que están relacionados con el funcionamiento de los sistemas subacuáticos móviles, requieren de un equipo especial para realizar la ubicación de estos sistemas o de los componentes de ellos. La ubicación de estos sistemas, por regla general, se realiza desde un barco o una plataforma, los cuales proveen el mantenimiento en dichos trabajos. Algunos tipos de trabajos en el mar pueden necesitar de la navegación de estos sistemas con respecto a un portador o un barco-proveedor. A menudo, al mismo tiempo, se requiere

\* *Profesor Investigador de la Universidad Tecnológica de la Mixteca*

determinar la ubicación de ellos con respecto a un objeto colocado en el fondo. Las distancias limitadas de visión y la presencia de las corrientes marinas obligan a controlar constantemente la ubicación mutua del portador y el sistema. Todas estas tareas nos llevan a obtener la posición de un objeto con respecto a un punto de observación o bien obtener las coordenadas de un objeto en un sistema de coordenadas más apropiado para una tarea concreta.

En el artículo se consideran algunas soluciones que permiten obtener una alta precisión de la medición de las coordenadas de los objetos, en el caso del uso de los sistemas de base corta superior.

## 2. Los métodos y sistemas para determinar la posición de los objetos subacuáticos

Para determinar la posición de los objetos subacuáticos, por regla, se usan tres métodos básicos [1].

### 2.1. Sistema de base larga (sistema BL)

Este método utiliza la medición de las distancias entre el objeto y los puntos en el fondo del mar con coordenadas conocidas. Las distancias se obtienen a través de la medición de los tiempos de propagación de los impulsos acústicos emitidos por un emisor colocado en el objeto y por los transpondedores colocados en el fondo del mar. La medición de las distancias se hace de la siguiente manera: el emisor colocado en el objeto emite un impulso de pedido, los transpondedores colocados en el fondo del mar al recibir el impulso de pedido emiten los impulsos de respuesta, los impulsos de los transpondedores se reciben por un receptor colocado en el objeto. Al saberse los tiempos de propagación hasta los transpondedores y el tiempo de propagación de la respuesta, se pueden calcular las distancias deseadas. Una cantidad mínima de los transpondedores colocados en el fondo es de tres. Para realizar este método es necesario instalar los transpondedores en el fondo y ubicar las coordenadas de ellos. En el caso de utilización de los sistemas de este tipo, las coordenadas del objeto se determinan en un sistema de coordenadas centrado en un punto en el fondo del mar.

### 2.2. Sistema de base corta (sistema BC)

Este método para determinar la posición de un objeto utiliza la medición de la distancia hasta el objeto con la ubicación angular del objeto mismo. La distancia se determina por la medición de los tiempos de propagación del impulso de pedido del sistema y del impulso de respuesta del transpondedor colocado en el objeto. La ubicación angular del objeto se determina por la medición del impulso de respuesta del transpondedor en los elementos receptores de la antena. El número mínimo de los elementos de la antena receptora es de tres. Por regla, estos tres elementos están colocados en un plano horizontal y forman dos bases receptoras (uno de los elementos se usa para ambas bases), las cuales se colocan en un ángulo recto. Los sistemas de este tipo tienen el tamaño adecuado para colocarlos en los portadores que proveen el trabajo en un polígono, para ellos no es necesario realizar la instalación de los transpondedores en el fondo, estos sistemas permiten trabajar en los polígonos con las profundidades grandes.

### 2.3. Sistema de base corta superior (sistema BCS)

Los sistemas de este tipo utilizan el mismo principio que los sistemas BC: se mide la distancia hasta el objeto y su ubicación angular. A diferencia de los sistemas BC (donde se miden los retardos del frente del impulso del transpondedor), en sistemas de este tipo, se mide la diferencia de las fases de la frecuencia portadora del impulso del transpondedor en las salidas de los elementos receptores de la antena. La antena receptora debe contener por lo menos tres elementos. Por regla, los elementos forman un triángulo rectángulo, y los dos lados iguales forman las bases receptoras. El tamaño de las bases receptoras debe ser menos de la mitad de la longitud de onda acústica de frecuencia portadora del impulso del transpondedor. El plano de la antena receptora, por regla, se alinea con el plano horizontal.

Demostraremos cómo se encuentran las coordenadas de un objeto a través de un sistema BCS de tres elementos. Supongamos que el objeto se encuentra en el medio espacio bajo relativamente del portador del sistema en un punto M. Introduciremos un sistema de coordenadas cartesianas  $xyz$ . Si al alinear las bases receptoras del sistema BCS con los ejes  $x$  y  $y$  del siste-

ma de coordenadas y al dirigir el eje z de sistema hacia abajo, podemos determinar las coordenadas del objeto (las coordenadas X, Y, Z del punto M) en el sistema de coordenadas introducido. Si el sistema BCS se coloca en un portador, las coordenadas del objeto miden con respecto al portador o en un sistema de coordenadas del portador del sistema BCS. El sistema BCS de tres elementos, el sistema de coordenadas introducido y el punto M se muestran en la Figura 1.

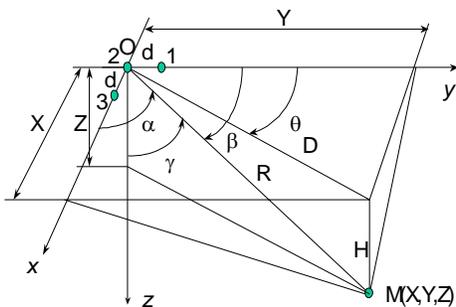


Figura 1. Punto M en el sistema de coordenadas del sistema BCS de tres elementos.

Designamos el tamaño de las bases receptoras como  $d$ . Al suponer que la distancia hasta el punto  $R \gg d$ , podemos escribir los valores de detenciones de tiempo  $\tau_{12}$  y  $\tau_{23}$  en las salidas de los elementos receptores de la base 12 y la base 23 respectivamente:

$$\tau_{12} = (d/c)x\cos\beta; \quad \tau_{23} = (d/c)x\cos\alpha, \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido en el agua.

Cuando el tamaño de las bases receptoras es menos que la mitad de la longitud de onda acústica de frecuencia portadora del impulso del transpondedor, los valores de detenciones de tiempo  $\tau_{12}$  y  $\tau_{23}$  se pueden utilizar para evaluación de la diferencia de las fases de las señales en las salidas de los elementos de la antena. Los valores de detenciones de tiempo  $\tau_{12}$  y  $\tau_{23}$  se miden a través del relleno de los contadores binarios. La frecuencia de relleno de los contadores se determina por los requerimientos de tener la resolución angular suficiente. Por medio de las expresiones (1) se obtienen los valores de los cosenos de dirección:  $\cos\alpha$  y  $\cos\beta$ . El tercer coseno de dirección se encuentra por una relación entre ellos:

$$\cos\gamma = (1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta)^{0.5}. \quad (2)$$

La distancia  $R$  se determina a través de medición del tiempo total de propagación de los impulsos de medida y de respuesta. Las coordenadas del punto  $M$  se encuentran por las expresiones:

$$X = R \cos\alpha, \quad Y = R \cos\beta, \quad Z = R \cos\gamma. \quad (3)$$

El ángulo azimutal  $\theta$  se determina por la expresión:

$$\theta = \arctg(\cos\alpha / \cos\beta). \quad (4)$$

### 3. Desarrollo del sistema de base corta superior

#### 3.1. El problema de los errores sistemáticos de la medición de las coordenadas

En el caso de utilización de un sistema BCS para medir las coordenadas de un objeto y en el caso de la colocación del sistema a bordo de un portador, el sistema debe funcionar en las condiciones del bamboleo del portador y en la presencia de los ruidos del portador y de los ruidos del mar. En particular la inestabilidad de la posición de la antena receptora en el espacio relacionada con el bamboleo del portador puede provocar la aparición de los errores de medición de la posición angular del objeto. La inconstancia de la velocidad del sonido en el agua (el cambio de la velocidad del sonido con el aumento de profundidad) provoca la aparición de los errores de medición de los tiempos de propagación y por consiguiente de las distancias. Esto también provoca la aparición de la refracción de los rayos acústicos y los errores adicionales en medición de la distancia y las coordenadas angulares. Efectos tales como la dispersión de las ondas acústicas en el cuerpo de la antena provocan la aparición de los errores en la medición de las detenciones de tiempo en los elementos receptores de la antena, y por consiguiente, de las coordenadas angulares. Entre los factores que afectan la precisión de la medición de coordenadas, es necesario mencionar también a la no linealidad de las funciones de coseno y por ello la imposibilidad de tener la precisión necesaria de medición de los cosenos que participan en el cálculo de las coordenadas en todos los diapasones del cambio de los ángulos. Las pruebas de los prototipos del sistema BCS básico (sistema BCS con antena receptora de tres elemen-

tos), confirman la influencia de todos estos factores en la precisión de medición de las coordenadas.

Entre esos factores podemos destacar tres principales, los cuales tienen influencia fundamental en la precisión de medición de las coordenadas de objetos. Estos factores son los siguientes:

- la no homogeneidad del ambiente de propagación y en particular el fenómeno de la refracción de rayos acústicos en el agua;
- la inestabilidad de la posición de la antena receptora en el espacio;
- el fenómeno de difracción de las ondas acústicas en el cuerpo de la antena receptora.

El primer factor se puede considerar como una causa de aparición de un componente sistemático de los errores de medición de las coordenadas y se puede tomar en cuenta por medio del cálculo de las trayectorias de rayos acústicos y la determinación de la posición real del objeto.

El segundo factor se puede considerar como un componente accidental por el carácter de la naturaleza de la agitación del mar. Pero si al realizar las mediciones de la orientación de la antena receptora en el espacio en los instantes de recepción de los impulsos del respondedor, este componente de los errores se puede transformar en parte de los componentes sistemáticos. Un portador del sistema BCS, por regla, tiene gran inercia, y el cambio de posición del portador en el espacio es más lento en comparación con la duración de un impulso del transpondedor. Prácticamente se puede contar con que la posición de la antena no cambia durante el intervalo de tiempo de medición de los retardos en los elementos receptores de la antena. La medición de la inclinación de la antena o los ángulos de diferencia y balance de la antena y el recálculo posterior de las coordenadas, permiten esperar la eliminación de este componente de los errores.

La reducción de la influencia del último factor se puede conseguir por medio del mejoramiento de construcción de la antena receptora del sistema BCS.

### 3.2. El aumento del número de los elementos receptores de la antena

Para evaluar la influencia del tercer factor mencionado, es necesario crear las condiciones de medición que permitan excluir la influencia de los primeros dos factores (la no homogeneidad del ambiente de la pro-

pagación del campo acústico y la agitación del mar). Realizar dichas condiciones permiten las pruebas en condiciones estacionarias (por ejemplo, cuando las pruebas se realizan en hielo) y cuando la antena receptora y el transpondedor se colocan en el mismo horizonte (en la misma profundidad). La distancia entre el sistema BCS y el transpondedor y la profundidad de colocación de ellos deben mantener la ausencia de la repercusión de los impulsos por la superficie del hielo y por el fondo. Tales pruebas fueron realizadas sobre un sistema BCS prototipo con antena de tres elementos receptores [2]. Para la evaluación de la precisión de las mediciones de la posición angular del objeto en dichas condiciones se midió la coordenada angular  $\theta$ . Los valores medidos del se compararon con los valores reales de los ángulos de dirección al transpondedor. Las pruebas, a pesar de la inmovilidad de la antena receptora relativamente del transpondedor, y la ausencia de la refracción, mostraron la presencia de errores de medición de coordenada  $\theta$ . Las repeticiones de las pruebas en las distancias diferentes mostraron la conservación del comportamiento y de los valores de los errores. El análisis del comportamiento angular de los errores de medición de la coordenada  $\theta$ , mostró que los errores tienen una cierta asimetría en plano horizontal, y que esta asimetría tiene una cierta relación con la asimetría de la construcción de la antena receptora. Al analizar los errores de medición junto con las particularidades de construcción de la antena, permitió hacer la conclusión de que los errores se determinan por el fenómeno de difracción de los rayos acústicos en el cuerpo de la antena y en los cuerpos de los elementos receptores de la misma. El mejoramiento de la construcción de la antena por la utilización de la superficie esférica del cuerpo conjunto con reducción de los tamaños de los elementos receptores, permitió reducir los valores de los errores, pero no resolver el problema de los errores de este tipo completamente.

Un método de reducción de la influencia de los errores sistemáticos de este tipo, es utilizar los elementos receptores redundantes por medio del aumento del número de elementos receptores de la antena. Con el aumento de la cantidad de los elementos receptores, también se puede resolver el problema de la asimetría de colocación de los elementos receptores en el cuerpo de la antena en plano horizontal. Con el mejora-

miento de este tipo, no se elimina el problema de difracción, pero en este caso el sistema tiene la posibilidad de medir una mayor cantidad de detenciones de tiempo en los elementos de la antena, realizarse cálculos de las coordenadas en las bases receptoras diferentes y después tomar el promedio de las coordenadas medidas. Consideraremos el añadido de un elemento receptor adicional en el plano horizontal. Este elemento se agrega de tal manera que se forma un cuadrado, y donde los lados del cuadrado conforman las bases receptoras de la antena. En la Figura 2 podemos ver que la agregación de un elemento suplementario, permite obtener cuatro sistemas BCS de tres elementos independientes.



Figura 2. La antena del sistema BCS con cuatro elementos.

Otra ventaja de la agregación del cuarto elemento es la realización de construcción de una antena receptora con simetría en plano horizontal. Esto permite esperar que los errores sistemáticos de las mediciones de la coordenada  $\theta$  tendrán un comportamiento angular más regular.

Para facilitar la consideración ulterior de los sistemas BCS pluricanales, nombraremos un sistema BCS de tres elementos como un sistema BCS básico. En este caso, podemos decir que un sistema BCS de cuatro elementos receptores, se compone por cuatro sistemas BCS básicos.

Se sabe que los sistemas BCS con disposición de elementos receptores en plano horizontal tienen un defecto: estos sistemas no pueden medir la coordenada vertical con alta precisión cuando el objeto se coloca en las profundidades cercanas a la profundidad de colocación de la antena receptora del sistema. La agregación del quinto elemento en otro plano horizontal permite formar las bases receptoras inclinadas y resolver este problema.

En el resto del artículo consideraremos una sistema BCS con antena receptora de cinco elementos. Cuatro elementos se colocan en el plano horizontal y

forman cuatro sistemas BCS básicos. El quinto elemento se coloca debajo de este plano horizontal en el centro geométrico de la antena, de manera que las cuatro bases inclinadas obtenidas tengan los tamaños iguales de las bases receptoras horizontales. En este caso el sistema BCS obtiene dos sistemas BCS básicos adicionales que se colocan en dos planos verticales y perpendiculares mutuos.

En el análisis ulterior suponemos también que el ambiente es homogéneo y que no hay la refracción de los rayos acústicos (el problema de la determinación de las coordenadas del objeto en el ambiente no homogéneo se puede considerar como una tarea independiente y no se considera en el resto del artículo).

### 3.3. El problema de la inestabilidad de la posición de la antena receptora en el espacio

Como se indicó arriba, la agitación del mar es un factor que provoca la inestabilidad de la antena receptora en el espacio y la aparición de los errores de la medición de las coordenadas. Suponemos que el sistema BCS tiene el bloque especial para medir los ángulos de diferencia y balance de la antena receptora. Consideraremos la antena receptora BCS con cinco elementos, cuatro elementos receptores de la antena se colocan en el plano horizontal y el quinto elemento se coloca abajo y forma las bases inclinadas de la antena.

La orientación relativa de la antena del sistema BCS de cinco elementos y los ejes longitudinal l-l' y lateral b-b' del portador del sistema se muestra en la Figura 3.

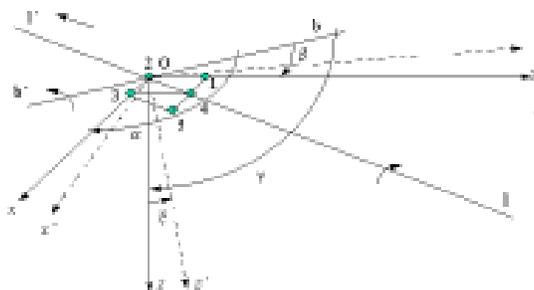


Figura 3. Orientación relativa de la antena receptora y los ejes horizontales del portador del sistema.

La flecha directa muestra la dirección del movimiento del portador. En el caso cuando el portador es una plataforma flotante la flecha muestra una dirección

que se toma como una dirección angular nula en plano horizontal. Las coordenadas de un objeto se determinan en un sistema de coordenadas del portador.

Podemos introducir el sistema de coordenadas del portador al coincidir su centro con el punto O de tal manera que el eje de la abscisa se dirige a lo largo del eje l-l' (la dirección positiva coincide con la dirección de la flecha), el eje de la ordenada se dirige a lo largo del eje b-b', y el eje z se dirige abajo.

Introducimos un sistema de coordenadas cartesiano auxiliar del sistema BCS. El principio del sistema de coordenadas O lo alinearemos con el punto de colocación del elemento receptor 2, el eje x lo alinearemos con la base receptora 23, el eje y se alinea con la base receptora 12, eje z lo dirigiremos hacia abajo. En la igual manera introducimos los sistemas de coordenadas particulares para cada sistema BCS básico (de tres elementos) del sistema BCS considerado y determinaremos las coordenadas del objeto en los sistemas de coordenadas particulares de cada sistema BCS básico. La reducción de todas las coordenadas a un sistema de coordenadas principal (por ejemplo, podemos elegir en su calidad el sistema particular 123) se realiza por medio de rotación de todos los sistemas particulares relativamente de ejes particulares de rotación. En la Figura 3 se puede ver que los sistemas de coordenadas particulares de los sistemas BCS básicos se viran relativamente a los ejes l-l', b-b' y Oz. Después de la reducción de todas las coordenadas de cada sistema BCS básico a un sistema de coordenadas principal, se toma el promedio de todas las coordenadas particulares.

Introducimos los ángulos de diferencia  $\xi$  y balance  $\zeta$  de la antena receptora del sistema BCS, los cuales por regla son los ángulos de diferencia y balance del portador del sistema. En la Figura 3 se muestra la situación cuando la antena tiene una inclinación en el ángulo de diferencia  $\xi$ . La inclinación de la antena en el ángulo  $\xi$  se puede considerar como la rotación de la antena relativamente del eje b-b'. En la Figura 3 se muestra como se vira el sistema de coordenadas del sistema BCS básico 123 relativamente al eje b-b'; después de rotación en el ángulo  $\xi$  el sistema xyz se transforma en el nuevo sistema de coordenadas x'y'z'. Respectivamente se viran todos los sistemas de coordenadas particulares de los sistemas BCS básicos.

Consideremos el caso del cálculo de las coordenadas del objeto para una inclinación arbitraria de la antena (consideramos el caso cuando el ángulo de diferencia  $\xi=0$  y el ángulo de balance  $\zeta=0$ ). Obtendremos las relaciones de cálculo para el sistema BCS básico con los elementos receptores 1, 2, 3. Designamos a este sistema BCS básico como un sistema BCS 123.

La rotación de la antena del sistema BCS 123, con su sistema de coordenadas particular xyz en el ángulo de diferencia  $\xi$ , se muestra en la Figura 4.

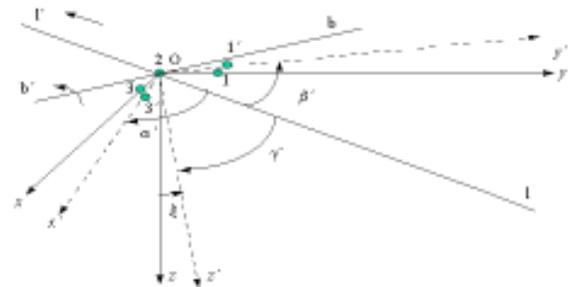


Figura 4. Rotación del sistema de coordenadas xyz del sistema BCS 123 en el ángulo de diferencia  $\xi$ .

Si la antena del sistema BCS 123 tiene un ángulo de diferencia  $\xi$ , este llevó a cabo la rotación del sistema de coordenadas xyz, relativamente al eje b-b', con la transformación del sistema de coordenadas xyz, en un sistema de coordenadas nuevo x'y'z'. Para el sistema de coordenadas xyz, tenemos los siguientes cosenos de dirección relativamente del eje b-b' (los ángulos  $\alpha, \beta, \gamma$  se han mostrado en la Figura 3):

$$\cos(x,b) = \cos\alpha = \cos(\pi/4) = \sqrt{2}/2 ; \quad (5)$$

$$\cos(y,b) = \cos\beta = \cos(\pi/4) = \sqrt{2}/2 ; \quad (6)$$

$$\cos(z,b) = \cos\gamma = \cos(\pi/2) = 0. \quad (7)$$

Para obtener las expresiones compactas de las coordenadas introducimos las siguientes designaciones para los cosenos de dirección:

$$\cos\alpha = \eta ; \quad \cos\beta = \chi ; \quad \cos\gamma = \nu. \quad (8)$$

Sean las coordenadas del objeto en el sistema de coordenadas xyz X, Y, Z. Al saber los cosenos de dirección de los ejes del sistema xyz con respecto al eje de rotación b-b', podemos encontrar las coordenadas del objeto en el sistema de coordenadas transfor-

mado. Las coordenadas  $X', Y', Z'$  en el sistema de coordenadas  $x'y'z'$  se calculan de acuerdo con las fórmulas [3]:

$$X' = X(\cos\xi + \eta^2(1 - \cos\xi)) + Y(v\sin\xi + \eta\chi(1 - \cos\xi)) + Z(-c\sin\xi + \eta\nu(1 - \cos\xi)), \quad (9)$$

$$Y' = X(-v\sin\xi + \chi\eta(1 - \cos\xi)) + Y(\cos\xi + \chi^2(1 - \cos\xi)) + Z(\eta\sin\xi + \chi\nu(1 - \cos\xi)), \quad (10)$$

$$Z' = X(\chi\sin\xi + \nu\eta(1 - \cos\xi)) + Y(-\eta\sin\xi + \nu\chi(1 - \cos\xi)) + Z(\cos\xi + \nu^2(1 - \cos\xi)). \quad (11)$$

Si la antena del sistema BCS además del ángulo de diferencia tiene un ángulo de balance  $\zeta$ , este llevó a cabo la rotación del sistema de coordenadas  $x'y'z'$  relativamente al eje  $l-l'$  con la transformación del sistema de coordenadas en un sistema de coordenadas nuevo  $x''y''z''$ . Las coordenadas  $X'', Y'', Z''$  en el sistema de coordenadas  $x''y''z''$  se calculan de acuerdo con las fórmulas (9), (10), (11) con sustitución de las coordenadas en la parte derecha de las ecuaciones por las coordenadas  $X', Y', Z'$ , el ángulo de diferencia por el ángulo de balance  $\zeta$ , también es necesario sustituir los cosenos de dirección del sistema de coordenadas  $xyz$  relativamente al eje  $b-b'$  por los cosenos de dirección del sistema de coordenadas  $x'y'z'$  relativamente al eje  $l-l'$ .

En caso de la rotación del sistema de coordenadas  $xyz$ , en el ángulo de diferencia  $\xi$ , los cosenos de dirección de la base 1-2 y de la base 2-3 relativamente al eje  $l-l'$ , estarán iguales, ya que  $\alpha' = \beta'$ .

La geometría de la rotación de la base 2-3 relativamente del eje  $b-b'$  se muestra en la Figura 5.

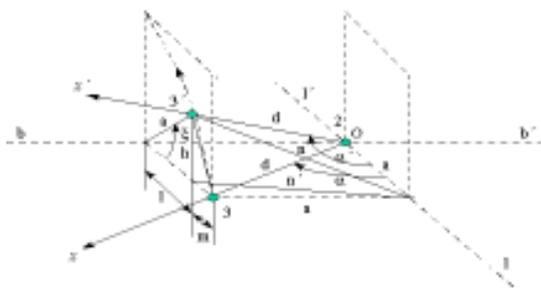


Figura 5. La rotación de la base 2-3 relativamente del eje  $b-b'$ .

En la Figura 5 tenemos un conjunto de triángulos rectángulos. Escribiremos un sistema de ecuaciones para encontrar el lado  $n$  del triángulo con lados  $n, n'$  y  $h$ :

$$\begin{aligned} h &= (d\sqrt{2}/2) \times \sin\xi; \\ m &= (d\sqrt{2}/2) \times (1 - \cos\xi); \\ (n')^2 &= m + d^2/2; \\ n^2 &= h^2 + (n')^2. \end{aligned}$$

Al saber la longitud del lado  $n$  podemos aplicar la ley de los cosenos y encontrar el coseno de dirección  $\cos\alpha'$  entre el eje  $x'$  y el eje de rotación  $l-l'$ .

$$\cos\alpha' = \frac{3d^2/2 - n^2}{d^2\sqrt{2}} \quad (12)$$

Al expresar  $n^2$  como una función de tamaño de la base receptora  $d$  y del ángulo de diferencia  $\xi$ , encontramos la expresión final para  $\cos\alpha'$ :

$$\cos\alpha' = \frac{\cos\xi}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

El segundo coseno de dirección  $\cos\beta'$ , se determina por la misma expresión (13).

El coseno de dirección entre el eje  $z'$  y el eje  $l-l'$  (ver la Figura 3), se encuentra por la expresión:

$$\cos\gamma' = \cos(\pi/2 - \xi). \quad (14)$$

Ahora podemos encontrar las coordenadas  $X'', Y'', Z''$  en el sistema de coordenadas  $x''y''z''$ , obtenido por rotación del sistema de coordenadas  $x'y'z'$  relativamente al eje  $l-l'$  en ángulo de balance  $\zeta$ . Las coordenadas del objeto  $X'', Y'', Z''$  se calculan por las fórmulas (9), (10) y (11), donde el ángulo de diferencia  $\xi$  se substituye por el ángulo de balance  $\zeta$ , las coordenadas  $X, Y, Z$  se substituyen por las coordenadas  $X', Y', Z'$ , los cosenos de dirección  $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$  por los cosenos de dirección  $\cos\alpha', \cos\beta', \cos\gamma'$  respectivamente.

Para obtener las coordenadas del objeto en un sistema de coordenadas de portador, es necesario realizar todas las rotaciones del sistema de coordenadas en orden regresivo, con la reducción posterior del sistema de coordenadas del sistema BCS 123 al sistema de coordenadas del portador.

Para el sistema BCS 123 de tres elementos, el algoritmo de cálculo de las coordenadas del objeto se realiza como una secuencia de tres pasos: el cálculo de las coordenadas  $X', Y', Z'$  del objeto en el sistema de coordenadas  $x'y'z'$ , en la base de los valores  $X'', Y'', Z''$ , obtenidos en la etapa de medición en el sistema de

coordenadas  $x''y''z''$ ; el cálculo de las coordenadas X, Y, Z del objeto en el sistema de coordenadas xyz en la base de los valores X', Y', Z' obtenidos en la etapa anterior en el sistema de coordenadas  $x'y'z'$ ; el cálculo de las coordenadas del objeto en el sistema de coordenadas del portador.

### 3.4. El caso de la antena receptora de cinco elementos

En el caso del sistema BCS con antena de cinco elementos, el sistema se compone por seis sistemas BCS básicos con las orientaciones deferentes. Las coordenadas del objeto se calculan en cada sistema BCS básico aparte. Al principio se obtienen las coordenadas por los sistemas BCS básicos horizontales: los sistemas BCS 123, 234, 341, 421. La diferencia entre los sistemas BCS 234, 341, 421 y el sistema BCS 123, consiste en sus propios valores del ángulo de diferencia, del ángulo de balance y del ángulo de rotación, para reducción del sistema de coordenadas de un sistema BCS básico al sistema de coordenadas del portador. Para los sistemas 153 y 452 es necesario hacer todos los pasos del algoritmo representado para el sistema BCS 123, al tomar en cuenta los valores correspondientes de los ángulos de diferencia y balance. Antes de la última rotación (para obtener las coordenadas en el sistema de coordenadas del portador), es necesario realizar una rotación adicional para reducir los sistemas BCS 153 y 452 al plano horizontal.

## 4. La evaluación de la precisión instrumental del sistema BCS para el caso de la aplicación del algoritmo desarrollado

Evaluaremos la precisión instrumental del sistema BCS para el caso de la aplicación del algoritmo desarrollado (se supone el funcionamiento del sistema, en condiciones de bamboleo). Consideraremos primero la precisión instrumental del sistema BCS de tres elementos (sistema BCS 123). En la calidad de la medida de la precisión instrumental del sistema tomaremos los errores relativos del cálculo de las coordenadas cartesianas del objeto. Los errores relativos se evalúan relativamente desde la distancia inclinada hasta el objeto observado.

Suponemos que las coordenadas reales (verdaderas) del objeto en el sistema de coordenadas del

sistema BCS 123 (se supone que el sistema no tiene inclinación) son: X, Y, X. Suponemos que las coordenadas reales (verdaderas) del objeto en el sistema de coordenadas del sistema BCS 123 con inclinación (la inclinación del sistema se determina por los ángulos de diferencia y balance) son: X'', Y'', Z''. Los valores de las coordenadas obtenidas con acuerdo al algoritmo desarrollado después del recálculo (las coordenadas en el sistema de coordenadas BCS 123 sin inclinación) son:  $X_{BCS}$ ,  $Y_{BCS}$ ,  $Z_{BCS}$ . Los valores de los errores absolutos de determinación de las coordenadas  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  se encuentran de acuerdo con las expresiones:  $\Delta X = X_{BCS} - X$ ,  $\Delta Y = Y_{BCS} - Y$ ,  $\Delta Z = Z_{BCS} - Z$ . La distancia real hasta el objeto observado se determina por la fórmula:  $R = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{0.5}$ . Los valores de los errores relativos de las coordenadas  $\delta X$ ,  $\delta Y$ ,  $\delta Z$  se determinarán por las siguientes expresiones:  $\delta X = \Delta X/R$ ;  $\delta Y = \Delta Y/R$ ;  $\delta Z = \Delta Z/R$ . Suponemos que el ratio de la frecuencia de relleno de los contadores-medidores de las detenciones a la frecuencia portadora de los impulsos del transpondedor es 100:1, se supone también que las detenciones de tiempo en las bases receptoras se miden sin errores y la precisión de medición de ellos se determina solamente por la frecuencia de relleno de los contadores.

En la Figura 6 se muestran los errores relativos de determinación de las coordenadas para el sistema BCS 123. Se considera el caso cuando un objeto está en la distancia horizontal 1000 m, la profundidad relativa de la antena receptora del sistema medidor y el objeto es 100 m, la posición angular del objeto en el plano horizontal se determina por el ángulo azimutal  $\varphi$  (el ángulo  $j$  al objeto se determina en el sistema de coordenadas del portador,  $\varphi = \theta + 3\pi/4$ , (ver las Figuras 1 y 3), el  $\varphi$  se cambia con el paso de 5 grados. En el instante de la recepción del impulso del transpondedor los ángulos de diferencia y balance  $\zeta$  y  $\xi$  son 5 grados y -5 grados respectivamente. Los errores relativos se representan como las funciones del ángulo azimutal  $\varphi$ . En una combinación de los valores de la distancia horizontal, la diferencia de profundidades, los ángulos  $\zeta$  y  $\xi$ , modelan una situación típica y en el mismo tiempo difícil para medir la coordenada Z con precisión alta (el valor del ángulo  $g$  está cerca a 90 grados).

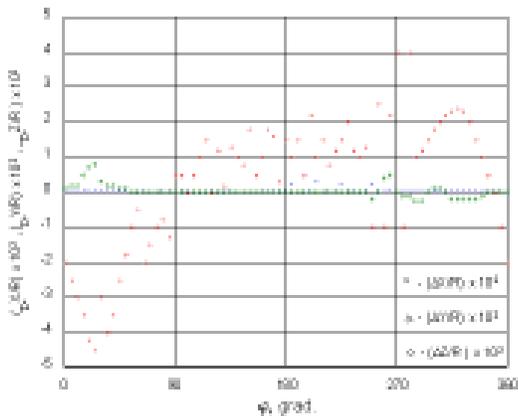


Figura 6. Los errores relativos de determinación de las coordenadas del objeto ubicado en el ángulo azimutal  $\varphi$  para el sistema BCS 123; la distancia horizontal  $D=1000$  m; la profundidad relativa del sistema medidor y el objeto  $H=100$  m; ángulo de diferencia  $\xi=5$  grad.; ángulo de balance  $\zeta= -5$  grad.

En la Figura 7 se muestran los errores relativos de determinación de las coordenadas para el sistema BCS de cinco elementos. Se toma el mismo ratio entre la frecuencia de relleno de los contadores-medidores de las detenciones y la frecuencia portadora de los impulsos del transpondedor (100:1). La ubicación relativa del sistema medidor y del objeto, es la misma que en el caso anterior (el objeto está en la distancia horizontal de 1000 m, la profundidad relativa del sistema medidor y el objeto es 100 m, en el instante de la recepción los ángulos de diferencia y balance son 5 grados y 5 grados respectivamente). Los errores relativos de la determinación de las coordenadas se representan como las funciones del ángulo azimutal  $\varphi$ .

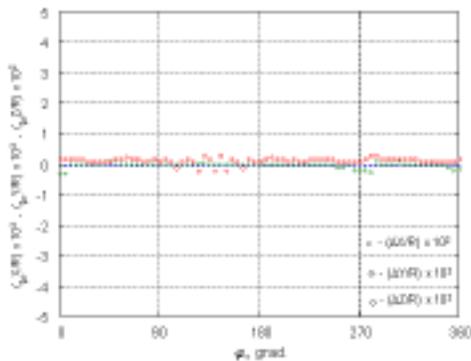


Figura 7. Los errores relativos de determinación de las coordenadas del objeto ubicado en el ángulo azimutal  $\varphi$  para el sistema BCS de cinco elementos; la distancia horizontal  $D=1000$  m; la profundidad relativa del sistema medidor y el objeto  $H=100$  m; ángulo de diferencia  $\xi=5$  grad.; ángulo de balance  $\zeta= -5$  grad.

Los resultados del cálculo de los errores de determinación de las coordenadas para el sistema BCS de 3 elementos (Figura 6), muestran que los valores de los errores relativos de determinación de las coordenadas horizontales X y Y, pueden tener los valores hasta del 1% de la distancia hasta el objeto, los valores de los errores relativos de la coordenada vertical Z pueden alcanzar los 5% de la distancia. La precisión instrumental del sistema BCS de tres elementos se puede evaluar por medio de los valores máximos de los errores relativos de determinación de las coordenadas o por los valores de determinación de la coordenada Z, es decir, por el valor de 5% de la distancia inclinada hasta el objeto.

En el caso de utilización del sistema BCS con cinco elementos se observa el mejoramiento significativo de la precisión instrumental del sistema. Los errores relativos de determinación de la coordenada Z se reducen de 5 a 10 veces (depende del intervalo considerado del ángulo azimutal, ver las Figuras 6 y 7). Se observa también la reducción de los errores relativos de determinación de las coordenadas horizontales X y Y por lo menos en 2 veces (ver los intervalos del ángulo azimutal: 0 a 45 grados y 250 a 270 grados en las Figuras 6 y 7).

Los resultados representados en las Figuras 6 y 7, así como los resultados obtenidos por el autor para otras ubicaciones relativas del sistema y del objeto, y para otros valores de los ángulos de diferencia y balance (durante la modelación matemática fue supuesto que los ángulos de diferencia y balance no sobrepasan los valores de  $\pm 30$  grados), muestran que el sistema BCS de cinco elementos en condiciones reales del mar tiene errores relativos de determinación de las coordenadas de menos de 0.3 % de la distancia inclinada hasta el objeto, en todo el diapasón del ángulo azimutal  $\varphi$ . Los valores obtenidos de los errores relativos se pueden utilizar para la evaluación de la precisión instrumental del sistema BCS de cinco elementos, con la configuración propuesta para la antena receptora.

## Conclusiones

En el presente artículo se ha considerado el problema de medición de la posición de los objetos subacuáticos con alta precisión en condiciones reales del mar. Se han representado los principales métodos mo-

denos para medir la posición de los objetos subacuáticos. Como un sistema medidor, ha sido elegido el sistema de base corta superior (sistema BCS). Al analizar los factores que provocan la aparición de errores sistemáticos de medición de las coordenadas de objetos, se ha propuesto modernizar la antena receptora del sistema al aumentar el número de los elementos receptores. En el artículo se ha considerado la construcción de una antena receptora de cinco elementos que formarían las bases receptoras horizontales e inclinadas adicionales de antena. El aumento del número de los elementos receptores y de las bases receptoras permitió utilizar para las mediciones el conjunto de los sistemas BCS básicos con las orientaciones diferentes en el espacio. Las condiciones reales del funcionamiento del sistema se toman en cuenta mediante la introducción de la inestabilidad de la antena receptora. La posición de la antena en el espacio se ha evaluado por los ángulos de diferencia y balance. Ha sido desarrollado un algoritmo para el cálculo de las coordenadas de los objetos, por medio de la solución sucesiva de los sistemas de ecuaciones para las coordenadas del objeto en los sistemas de coordenadas particula-

res de los sistemas BCS básicos, al tomar en cuenta la rotación de los sistemas de coordenadas por los ángulos de diferencia y balance. Los cálculos de los errores relativos de determinación de las coordenadas para un sistema BCS básico y el sistema BCS de cinco elementos han mostrado el mejoramiento significativo de la precisión instrumental del sistema BCS después de su modernización.

## Bibliografía

MILNE P.H.

1983 *Underwater Acoustic Positioning Systems*. Gulf Publishing Company.

ARKHIPOV M.A., ARKHIPOV V.A., SAIGAK A.A.

1993 "Un sistema sonar para la determinación de la posición de objetos subacuáticos", *Complejo para levantar objetos hundidos*. Publicación de la Universidad Estatal Técnica de la Marina de San Petersburgo, San Petersburgo, Rusia. Pp., 194-198.

BRONSHTEIN I.N., SEMENDYAYEV K.A.

1997 *Handbook of Mathematics*. 3a. edición, Springer-Verlag, New York.