

УДК 355.42

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЕЛЕНГА ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛА В ПАССИВНОМ ГИДРОЛОКАТОРЕ

С.Р. ГЕЙСТЕР<sup>1</sup>, Д.Н. НГУЕН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт Вооруженных сил Республики Беларусь, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30 марта 2017

**Аннотация.** Описывается метод измерения пеленга (азимута) движущегося надводного (подводного) объекта в пассивном гидролокаторе. Рассматриваемый метод является модификацией метода фазового мгновенного сравнения сигналов. В основе метода лежит измерение времени задержки сигналов, принятых в разнесенных приемных пунктах. Отличительной особенностью метода является использование для обработки способа когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала, разработанного авторами. Использование этого способа обеспечивает повышение отношения сигнал/шум в каналах приема и приводит к снижению ошибок измерения пеленга в пассивном гидролокаторе.

**Ключевые слова:** пассивный гидролокатор, измерение, пеленг, время задержки, когерентное накопление, спектральные составляющие.

**Abstract.** The method of measuring bearing (azimuth) of a moving surface (underwater) object in the passive sonar is described. This method is considered to be a modification of signals phase comparing method. It is based on the measurement of the delay time between signals received at different signal reception point. A distinctive feature of this method is the use for signal processing method of coherent accumulation of the spectral components of the received signal, developed by the authors. This method provides increase signal/noise ratio in the reception channels, therefore decrease errors of measuring bearing in the passive sonar.

**Keywords:** passive sonar, measurement, bearing, delay time, coherent accumulation, spectral components.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 105, No. 3, pp. 52–57**

**Measurement of the moving objects' bearing by coherent integration of the spectral components of signals in the passive sonar**

**S.R. Heister, D.N. Nguyen**

### Введение

В пассивном гидролокаторе (ГЛ) в основе определения местоположения объекта лежит определение угловых координат [1]. При ведении обзора основное значение имеет определение азимута обнаруженного объекта или пеленга.

Существует много методов для определения угловых координат объекта, основными из которых являются [2]:

– методы сканирования диаграммой направленности антенны (например, метод линейного сканирования);

– методы мгновенного сравнения сигналов, которые основаны на сопоставлении амплитуд (метод амплитудного мгновенного сравнения) или фаз (метод фазового мгновенного сравнения).

Заметим, что в типовом случае флуктуирующего сигнала методы мгновенного сравнения превосходят по точности методы сканирования. В приложении к пассивной гидролокации, где размеры антенн необходимо максимально уменьшать, основное внимание целесообразно сосредоточить на методе фазового мгновенного сравнения. Приложение этого метода в пассивной гидролокации предполагает определение разности времени задержки полезных сигналов, принятых двумя приемными пунктами. Однако низкое отношение сигнал/помеха, характерное для малозумящих объектов или больших дальностей обнаружения, и помехи ревербераций приводят к большим ошибкам измерения в устройствах, использующих традиционные способы и алгоритмы обработки принятого сигнала. При этом уменьшение ошибок измерения возможно путем радикального увеличения размеров и усложнения конструкции гидроакустических антенн, что, как правило, недопустимо. В итоге возникает потенциальное ограничение на максимальную дальность, на которой в пассивном гидролокаторе достигаются требуемые ошибки пеленгации. Эта дальность определяется параметрами гидролокатора, типом объекта и условиями его наблюдения.

Далее рассматривается предлагаемый для применения в пассивном гидролокаторе модифицированный метод фазового мгновенного сравнения, отличающийся от известных использованием в каналах обработки когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала [3].

### Метод измерения угловых координат на основе способа когерентного накопления спектральных составляющих сигнала

На рис. 1 приводится иллюстрация к определению угловой координаты (пеленга) объекта (обозначен буквой O), который находится в дальней зоне по отношению к гидроакустическому пеленгатору с двумя каналами приема ГК1 и ГК2, разнесенными в плоскости измерения на базу  $d$ . Гидроакустическая волна приходит под углом  $\beta$  по отношению к линии, проведенной перпендикулярно к линии базы.

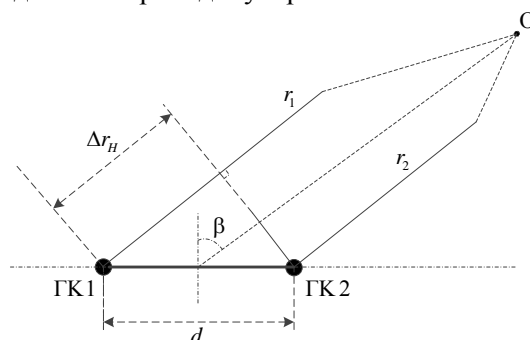


Рис. 1. Иллюстрация принципа определения угловой координаты объекта

Угловое направление на объект определяется на основе разности хода волны  $\Delta r_H$  :

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\Delta r_H}{d}\right). \quad (1)$$

Разность хода  $\Delta r_H$  описывается выражением

$$\Delta r_H = r_1 - r_2 = C_v \Delta t_z, \quad (2)$$

где  $r_1, r_2$  – расстояние от объекта до антенн каналов приема ГК1 и ГК2 соответственно;

$\Delta t_z = \frac{r_1 - r_2}{C_v} = t_{z1} - t_{z2} = \frac{\Delta r_H}{C_v}$  – разность времен задержки сигналов, принятых каналами ГК1 и

ГК2;  $C_v$  – скорость распространения звука в воде.

С учетом (2) выражение (1) преобразуется к виду

$$\beta = \arcsin\left(\frac{C_v \Delta t_z}{d}\right). \quad (3)$$

В диапазоне однозначного измерения угла  $[-90^\circ, 90^\circ]$  зависимость углового положения объекта от разности времен задержки сигналов является монотонной функцией. На рис. 2 представлена зависимость углового положения объекта  $\beta$  от разности  $\Delta t_z$ .

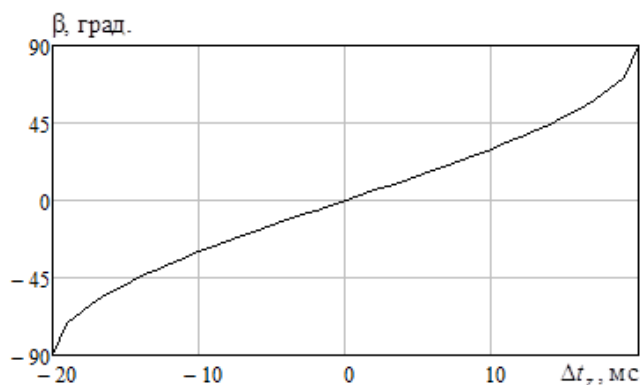


Рис. 2. Зависимость углового положения объекта от разности времен задержки сигналов

Для обеспечения однозначности измерения пеленга в пределах сектора  $\pm 90^\circ$ , величину базы  $d$  необходимо выбирать [2] на основе неравенства

$$d \leq \frac{C_v T_{r\_min}}{2} = \frac{C_v}{2f_{r\_max}}, \quad (4)$$

где  $T_{r\_min}$  – минимальный период повторения полезного сигнала, определяющий его максимальную частоту повторения  $f_{r\_max} = 1/T_{r\_min}$ .

Заметим, что при типичном на практике варьировании величины  $T_{r\_min}$  для повышения точности измерения с одновременным выполнением условия однозначности, целесообразно использовать набор каналов приема, антенны которых расположены равномерно на прямой линии в плоскости измерения. При этом выбор каналов приема и, соответственно, базы осуществляется адаптивно в соответствии с измеренной в устройстве обнаружения частотой повторения сигнала  $f_{r\_izm}$ . Для повышения точности измерения  $f_{r\_izm}$  при низких отношениях сигнал/помеха целесообразно использовать описанное в [3] устройство обнаружения, построенное на основе способа когерентного накопления спектральных составляющих сигнала. В итоге на основе измеренной частоты  $f_{r\_izm}$  из совокупности каналов выбираются два приемных канала, расстояние между которыми (база) является наибольшим при одновременном выполнении условия

$$d \leq \frac{C_v}{2f_{r\_izm}}. \quad (5)$$

В предлагаемом модифицированном методе фазового мгновенного сравнения разность задержек  $\Delta t_z$  определяется в следующей последовательности:

- устройство обнаружения, функционирующее на основе способа когерентного накопления принятого сигнала [3], обнаруживает объект, определяет базовую частоту следования полезного сигнала  $f_{b1}$ , связанную с частотой вращения гребного винта, и выдает на измеритель пеленга значение  $f_{r\_izm} = f_{b1}$ ;

- в измерителе пеленга выбираются (коммутируются) для измерения два приемных пункта, база которых соответствует требованию (5);

- в течение времени когерентного накопления в приемных каналах ГК1 и ГК2 выполняется синхронный прием дискретных временных отсчетов сигналов, следующих с частотой дискретизации  $F_{dis}$ , и формирование путем прямого быстрого преобразования Фурье (БПФ) с числом точек  $N_{FFT}$  амплитудно-фазочастотных спектров  $G_1(n), n = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  и  $G_2(n), n = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  соответственно;

– из сформированных спектров  $G_1(n), n = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  и  $G_2(n), n = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  выделяются спектральные составляющие  $G_1(l_k), k = \overline{\pm 1, K_{KN}}$  и  $G_2(l_k), k = \overline{\pm 1, K_{KN}}$ , частоты которых  $l_k F_{dis} = k f_{b1}$  соответствуют измеренной частоте  $f_{b1}$ ;

– из выделенных спектральных составляющих  $G_1(l_k), k = \overline{\pm 1, K_{KN}}$  и  $G_2(l_k), k = \overline{\pm 1, K_{KN}}$  путем обратного БПФ формируются сигналы  $U_{L1}(t) = U_{L1}(mT_{dis}), m = \overline{0, N_{FFT} - 1}$  и  $U_{L2}(t) = U_{L2}(mT_{dis}), m = \overline{0, N_{FFT} - 1}$ , принятые приемными каналами ГК1 и ГК2;

– формируется оценка взаимной корреляционной функции  $R_{12}(\tau) = U_{L1}(t)U_{L2}^*(t - \tau)$  сигналов  $U_{L1}(t)$  и  $U_{L2}(t)$ , где время взаимной задержки  $\tau$  изменяется в интервале  $\tau = [-T_{dis}(N_{FFT} - 1); +T_{dis}(N_{FFT} - 1)]$ ;

– на основе поиска максимума взаимной корреляционной функции определяется искомая разность задержек  $\Delta t_z$ , которая однозначно определяет угловое положение объекта  $\beta$ .

Сигналы  $U_{L1}(t)$  и  $U_{L2}(t)$ , принятые двумя каналами приема, содержат полезные сигналы  $U_{S1}(t)$  и  $U_{S2}(t)$ , а также помехи  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$ , т.е.:  $U_{L1}(t) = U_{S1}(t) + h_1(t)$ ,  $U_{L2}(t) = U_{S2}(t) + h_2(t)$ .

Так как полезные сигналы  $U_{S1}(t)$  и  $U_{S2}(t)$  принадлежат одному источнику, а размер базы  $d$  в типовом случае (в том числе и в рассматриваемом) значительно меньше радиуса пространственной корреляции, можно полагать:

$$U_{S1}(t) = U_S(t), \quad U_{S2}(t) = U_S(t - \Delta t_z). \quad (6)$$

С учетом этого

$$R_{12}(\tau) = U_{L1}(t)U_{L2}^*(t - \tau) = R_S(\tau - \Delta t_z) + U_S(t)h_2^*(t - \tau) + U_S^*(t - \Delta t_z - \tau)h_1(t) + R_{h1,2}(\tau), \quad (7)$$

где  $R_{12\_S}(\tau)$  – автокорреляционная функция полезного сигнала для анализируемой точки приема;  $R_{h1,2}(\tau)$  – взаимная корреляционная функция помех в двух рассматриваемых каналах приема, включающих в общем случае как внутренние шумы трактов приема, так и внешние помехи разного происхождения;  $U_S(t)h_2^*(t - \tau)$ ,  $U_S^*(t - \Delta t_z - \tau)h_1(t)$  – взаимные корреляционные функции полезного сигнала и помех. Все упомянутые корреляционные функции формируются с учетом ограниченного интервала приема  $T_{dis}N_{FFT}$ . Примеры исследований корреляционных свойств гидроакустических сигналов представлены в [4].

### Оценка ошибки измерения угловых координат объекта в пассивном гидролокаторе

Факторы, влияющие на ошибки измерения угловых координат объектов в пассивном ГЛ, определяются случайным характером изменения трассы распространения гидроакустических волн, большим разбросом конструкций и параметров движущих винтовых устройств случайно появляющихся объектов наблюдения, а также случайным составом и параметрами помеховых сигналов, сформированных в трактах каналов приема. Поэтому задача измерения угловых координат объектов в пассивном ГЛ является статистической. Решению задач такого типа посвящено много исследований, примером которых является [5].

Далее рассмотрим упрощенную ситуацию, в которой описанный измеритель функционирует в идеализированных условиях – ГЛ и объект являются неподвижными, полезный сигнал не флуктуирует, помехи представляют собой белый шум с нормальным законом распределения комплексных амплитуд, относительно большое время наблюдения. Ошибка измерения угловой координаты объекта определяется ошибкой измерения времени задержки  $\Delta t_z$ , на которую влияет соотношение полезного сигнала и шума. Полагаем, что оценка  $\Delta t_z$  характеризуется нормальными плотностями распределения со среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{\Delta t_z}$  и математическим ожиданием  $m_{\Delta t_z}$ . В соответствии с (3) ошибка измерения угловой координаты объекта в пассивном ГЛ зависит от ошибок

взаимного позиционирования антенн приемных каналов, ошибки определения скорости распространения звука в воде, ошибки измерения времени задержки  $\Delta t_z$ . Далее проанализируем влияние только последнего фактора – ошибки измерения  $\Delta t_z$ , полагая, что база  $d$  и скорость распространения звука  $C_v$  определены точно.

С учетом действия большого числа примерно равноценных случайных факторов плотность распределения измеренного значения  $\Delta \hat{t}_z$  можно полагать нормальной и описывать выражением:

$$p(\Delta \hat{t}_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta \hat{t}_z}} \exp \left[ -\frac{(\Delta \hat{t}_z - m_{\Delta \hat{t}_z})^2}{2\sigma_{\Delta \hat{t}_z}^2} \right]. \quad (8)$$

Зависимость, описываемая выражением (3), является монотонной, но в полном интервале  $[-90^\circ, 90^\circ]$  – нелинейной. Это создает определенные сложности в аналитическом получении выражения для плотности распределения измеренного значения угла  $p(\hat{\beta})$ . Однако в интервале углов  $[-45^\circ, 45^\circ]$  связь между  $\beta$  и  $\Delta t_z$  можно аппроксимировать линейной зависимостью вида  $\beta \cong \frac{C_v}{d} \Delta t_z$ , [рад]. Соответственно в интервале углов  $[-45^\circ, 45^\circ]$  плотность распределения значения углового положения  $\beta$  определяется [6] выражением

$$p(\hat{\beta}) = |I| p(\Delta \hat{t}_z), \quad (9)$$

где  $I$  – якобиан преобразования, равный  $I = \frac{d\Delta \hat{t}_z}{d\hat{\beta}} = \frac{d}{C_v}$ .

С учетом того, что  $\Delta t_z = \frac{d}{C_v} \beta$ , получим:

$$p(\hat{\beta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta \hat{t}_z} \frac{C_v}{d}} \exp \left[ -\frac{\left( \frac{d}{C_v} \hat{\beta} - m_{\Delta \hat{t}_z} \right)^2}{2\sigma_{\Delta \hat{t}_z}^2} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\hat{\beta}}} \exp \left[ -\frac{(\hat{\beta} - m_{\hat{\beta}})^2}{2\sigma_{\hat{\beta}}^2} \right]. \quad (10)$$

В итоге, в диапазоне углов  $\pm 45^\circ$  пеленг объекта распределен по нормальному закону с математическим ожиданием  $m_{\hat{\beta}} = \frac{C_v}{d} m_{\Delta \hat{t}_z}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{\hat{\beta}} = \frac{C_v}{d} \sigma_{\Delta \hat{t}_z}$ .

### Заключение

Разработанный модифицированный метод измерения пеленга объекта обеспечивает однозначность измерения в широком диапазоне частот полезного сигнала благодаря адаптивному изменению размера базы приемников. Для реализации этого вида адаптации приемная антенна должна представлять собой набор коммутируемых приемников, расположенных линейно (почти линейно) в плоскости измерения. Использование при обработке сигналов в измерителе пеленга разработанного ранее способа когерентного накопления спектральных составляющих сигнала обеспечивает повышение отношения сигнал/шум и, соответственно, уменьшение ошибок измерения. Измерение пеленга основано на измерении разности задержек  $\Delta t_z$  сигналов, принятых двумя разнесенными приемниками. Показано, что в интервале измеряемых углов  $\pm 45^\circ$  связь между пеленгом  $\beta$  и разностью  $\Delta t_z$  можно аппроксимировать линейной зависимостью. Это позволяет для указанного диапазона углов полагать, что закон распределения оценки пеленга  $p(\hat{\beta})$  будет иметь вид, соответствующий виду закона распределения  $p(\Delta \hat{t}_z)$  оценки разности задержек.

## Список литературы

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
2. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1983. 456 с.
3. Гейстер С.Р., Нгуен Д.Н. Способ когерентного накопления спектральных составляющих принятого сигнала в пассивном гидролокаторе // Наука и военная безопасность. 2016. № 3(50). С. 36–38.
4. Новиков А.К. Корреляционные измерения в корабельной акустике. Л.: Судостроение, 1971. 256 с.
5. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3: Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех / Пер. с англ. Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Советское радио, 1977. 664 с.
6. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. М.: Высшая школа, 1971. 328 с.

## References

1. Urik. R.J. Osnovnyj hydroakystiki. L.: Sudostroenie, 1978. 448 s. (in Russ.)
2. Ohrimenko A.E. Osnovy radiolokacii i radioelektronnaja bor'ba. M.: Voenizdat, 1983. 456 s. (in Russ.)
3. Heister S.R., Nguyen D.N. Sposob koherentnogo nakoplenia spektralnux sostavliasix priniatogo signala v passivnom hidrolokatore // Nauka i voenaja bezopasnost. 2016. No 3 (50). S. 36–38. (in Russ.)
4. Novikov A.K. Korreljasionye izmerenija v korabelnoi akutike. L.: Sudostroenie, 1971. 256 s. (in Russ.)
5. Van Tris G. Teoria obnaruženia, ocenok i moduliacii. T 3. Obrabotka signalov v radio i hydrolokacii i priem sluchainyh gaussovux signalov na fone pomex / Per. C engl. Pod. red. V. T. Goriainova. M.: Sovetskoe radio, 1977. 664 s. (in Russ.)
6. Gurskii E.I. Teoria verojatnostei s elementami matematicheskoj statistiki. M.: Vuksaja skola, 1971. 328 s. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Гейстер С.Р., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник государственного Научно-исследовательского института Вооруженных Сил Республики Беларусь.

Нгуен Д.Н., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Heister S.R., D. Sci., professor, main researcher associate of State Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus.

Nguyen D.N., postgraduate student of department of information radiotechnologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-715-65-20  
e-mail: dongnn84@gmail.com  
Нгуен Нгок Донг

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian state university of  
informatics and radioelectronics  
tel. +375-29-715-65-20  
e-mail: dongnn84@gmail.com  
Nguyen Ngoc Dong