

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.1>

УДК 551.463.621.391

## ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова  
РАН, 141120, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.

**Аннотация:** Рассмотрен частотный метод измерения угловых координат подводных аппаратов системой позиционирования использующей сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Метод предназначен для определения пространственного положения подводного аппарата по сигналам установленного на нем акустического маяка и основан на измерениях разности частот ЛЧМ сигналов, принимаемых на две или более разнесенные антенны с заданным пространственным положением. Показана возможность практического использования данного метода для измерения пеленгов буксируемого или автономного аппарата. Представлены результаты моделирования и натурных испытаний рассмотренного способа вычисления угловых координат.

**Ключевые слова:** гидроакустические системы, акустический маяк, сигналы с линейной частотной модуляцией, методы измерения угловых координат, системы локального позиционирования.

**Abstract.** The article is devoted to the application of the frequency method of measuring the angular coordinates of underwater vehicles by a positioning system which uses chirp signals. The method is designed to determine the spatial position of an underwater vehicle based on the signals of an installed acoustic beacon and uses measurements of the frequency difference of chirp signals received by two or more spaced antennas with a given spatial position. The experiment demonstrates

possibility of the practical application the method for measuring the bearings of a towed or autonomous vehicle. The article presents the results of modeling and field tests of the considered calculating angular coordinate method.

**Key words:** sonar systems, acoustic beacon, chirp signals, methods for measuring angular coordinates, local positioning systems.

## **Введение**

При проведении гидрографических и иных работ мобильными автономными подводными аппаратами (ПА) возникает проблема определения пространственного положения аппаратуры съемки относительно буксирующего или сопровождающего судна. Применяемые для решения этой задачи системы позиционирования в большинстве своем основаны на гидроакустических принципах и используют в своей работе различные подходы к обработке данных [1]. Как правило, в таких комплексах для обеспечения синхронизации работы аппаратуры подводных аппаратов с измерительной системой на сопровождающем судне создаются каналы связи. Это либо кабель-трос, либо акустический канал [1,2]. В данной работе предложен и проанализирован способ, позволяющий проводить пеленгацию ПА без канала синхронизации. Метод основан на возможности проведения угловых измерений положения подводного аппарата по ЛЧМ сигналам установленного на нем акустического маяка. Метод прост в реализации, обеспечивает вычисление угловых координат с точностью достаточной для практических целей и может быть применен в гидроакустических системах подводного позиционирования.

### **1. Частотный метод измерения угловых координат ПА**

В основе рассматриваемого метода пеленгации лежит принцип определения углового положения акустического маяка ПА по измерениям разности частот ЛЧМ сигналов принимаемых на две разнесенные антенны  $A_1$  и  $A_2$ , установленные стационарно или на сопровождающем судне. При измерении горизонтального угла (азимута) положение подводного аппарата

относительно антенной системы обеспечивающего судна схематично представлено на Рис. 1.

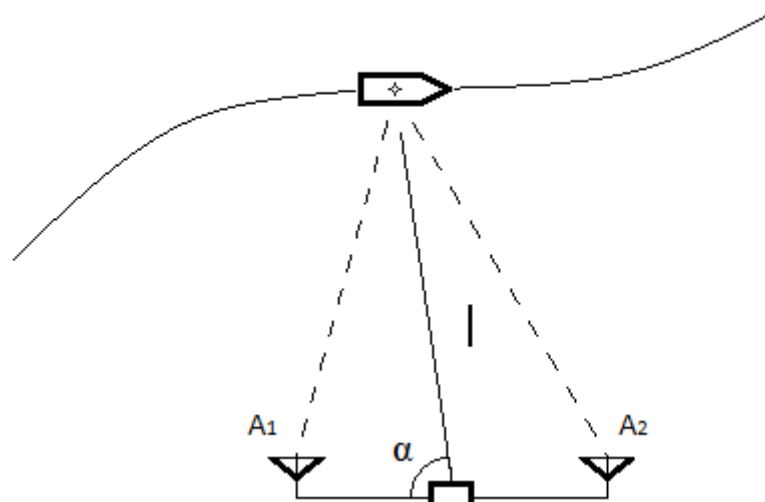


Рис. 1. Схема движения подводного аппарата с акустическим маяком относительно двух антенного интерферометра. Горизонтальная база интерферометра  $d = A_1A_2$ .

Упрощенная функциональная схема измерителя угловой координаты показана на Рис. 2. Здесь  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  – ЛЧМ сигналы акустического маяка, принимаемые антеннами  $A_1$  и  $A_2$  интерферометра,  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  – соответствующие им комплексные аналитические сигналы,  $S_2^*(t)$  – сигнал комплексно сопряженный сигналу  $S_2(t)$ . Отсчет угла  $\alpha$  ведется по часовой стрелке от направления вертикали вниз.

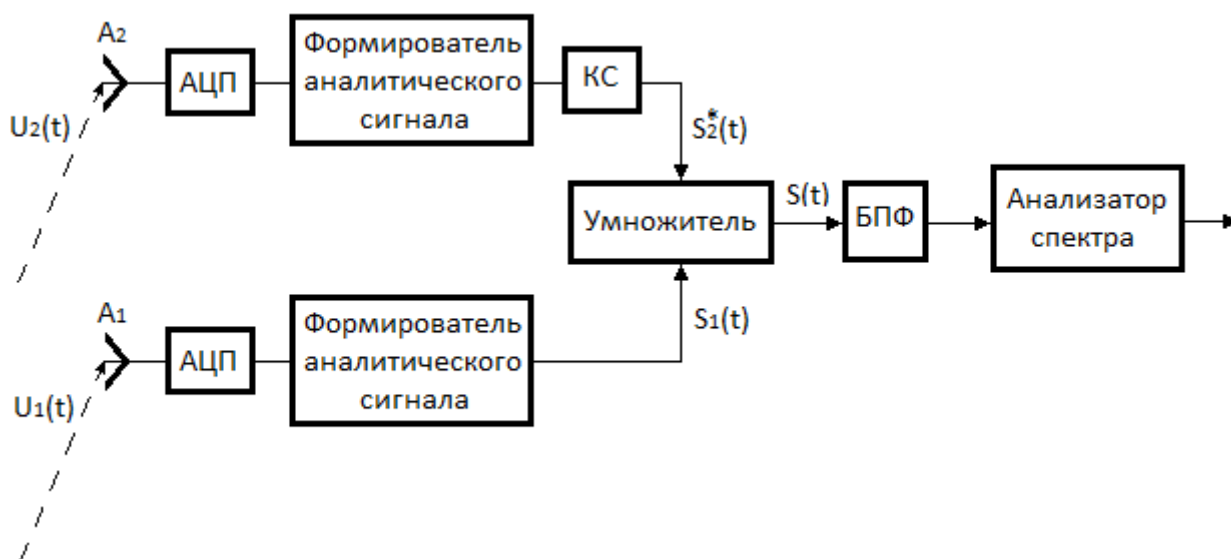


Рис. 2. Функциональная схема измерителя угловой координаты подводного аппарата.

При работе измерителя в приемном канале антенны  $A_1$  после оцифровки вещественного сигнала  $U_1(t)$  формируется аналитический ЛЧМ сигнал  $S_1(t)$  [3-6], который представим в виде:

$$S_1(t) = S_{01} e^{j\left(2\pi f_n + \frac{\pi f_{\text{дев}}}{\tau_{\text{и}}} t\right)t} \quad (1)$$

где  $f_n$  - начальная частота сигнала,  $f_{\text{дев}}$  - частотная девиация,  $\tau_{\text{и}}$  - длительность импульса.

Аналогично в приемном канале второй антенны имеем:

$$S_2(t) = S_{02} e^{j\left(2\pi f_n + \frac{\pi f_{\text{дев}}}{\tau_{\text{и}}}(t-\Delta t)\right)(t-\Delta t)} \quad (2)$$

где  $\Delta t$  - время запаздывания сигнала по отношению к сигналу на первой антенне. Временная задержка  $\Delta t$  связана с углом прихода  $\alpha$  соотношением:

$$\Delta t = \frac{d}{c} \cos(\alpha) \quad (3)$$

Здесь  $d$  - база интерферометра,  $c$  - скорость звука в воде. Положение сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  на временной оси показано на Рис. 3, где  $\tau_{\text{и}}$  - длительность импульса, а  $\tau_{12}$  - временной интервал области пересечения сигналов:  $\tau_{12} = \tau_{\text{и}} - |\Delta t|$ .

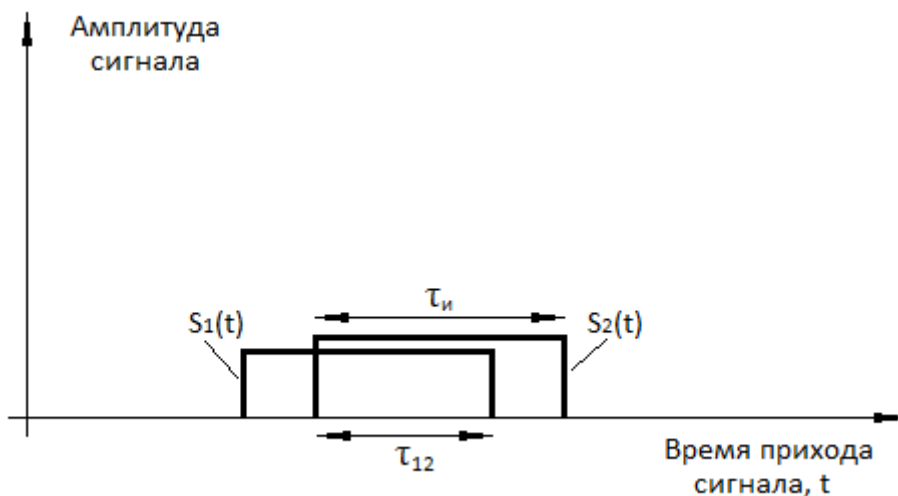


Рис. 3. Положение сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  на временном интервале.

Принятые сигналы двух приемных каналов перемножаются, причем предварительно в одном из них, на основе  $S_2(t)$ , выполняется формирование комплексно-сопряженного колебания  $S_2^*(t)$ . Сигнал  $S(t)$  на выходе умножителя:

$$S(t) = S_1(t)S_2^*(t) = S_{01}S_{02}e^{j(2\pi f_n \Delta t - \frac{\pi f_{\text{дев}}}{\tau_n} \Delta t^2)} e^{j(\frac{2\pi f_{\text{дев}} \Delta t}{\tau_n})t} \quad (4)$$

Модуль спектральной плотности этого сигнала:

$$|G(f)| = \left| \frac{S_{01}S_{02}}{\pi(f-f_0)} \sin(\pi(f-f_0)\tau_{12}) \right| \quad (5)$$

где введено обозначение:

$$f_0 = \frac{f_{\text{дев}} \Delta t}{\tau_n} \quad (6)$$

Для определения спектральных составляющих функции  $S(t)$  выполняется гармонический анализ, который при цифровой обработке данных проводится с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). На заключительном этапе обработки полученные спектры анализируются на предмет выявления положения максимума спектральной составляющей  $f_0$ . Направление на объект вычисляется с помощью соотношений (6) и (3) по формуле:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{f_0 \tau_n c}{f_{\text{дев}} d} \right) \quad (7)$$

На Рис. 4, для примера, отображены спектры ряда модельных сигналов, полученные после процедуры БПФ. При моделировании параметры ЛЧМ импульсов были:  $f_n = 52$  кгц,  $f_{\text{дев}} = -27$  кгц,  $\tau_n = 5$  мсек. Частота оцифровки  $f_{\text{дискр}} = 54$  кгц, база интерферометра  $d = 1,5$  м, скорость звука в воде  $c = 1500$  м/сек. Сигналы сформированы для углов прихода:  $\alpha = 60^\circ$  на Рис. 4(а);  $\alpha = 90^\circ$  на Рис. 4(б);  $\alpha = 130^\circ$  на Рис. 4(в). На рисунках хорошо видно, что положение спектрального максимума смещается по оси частот в зависимости от угла направления на объект.

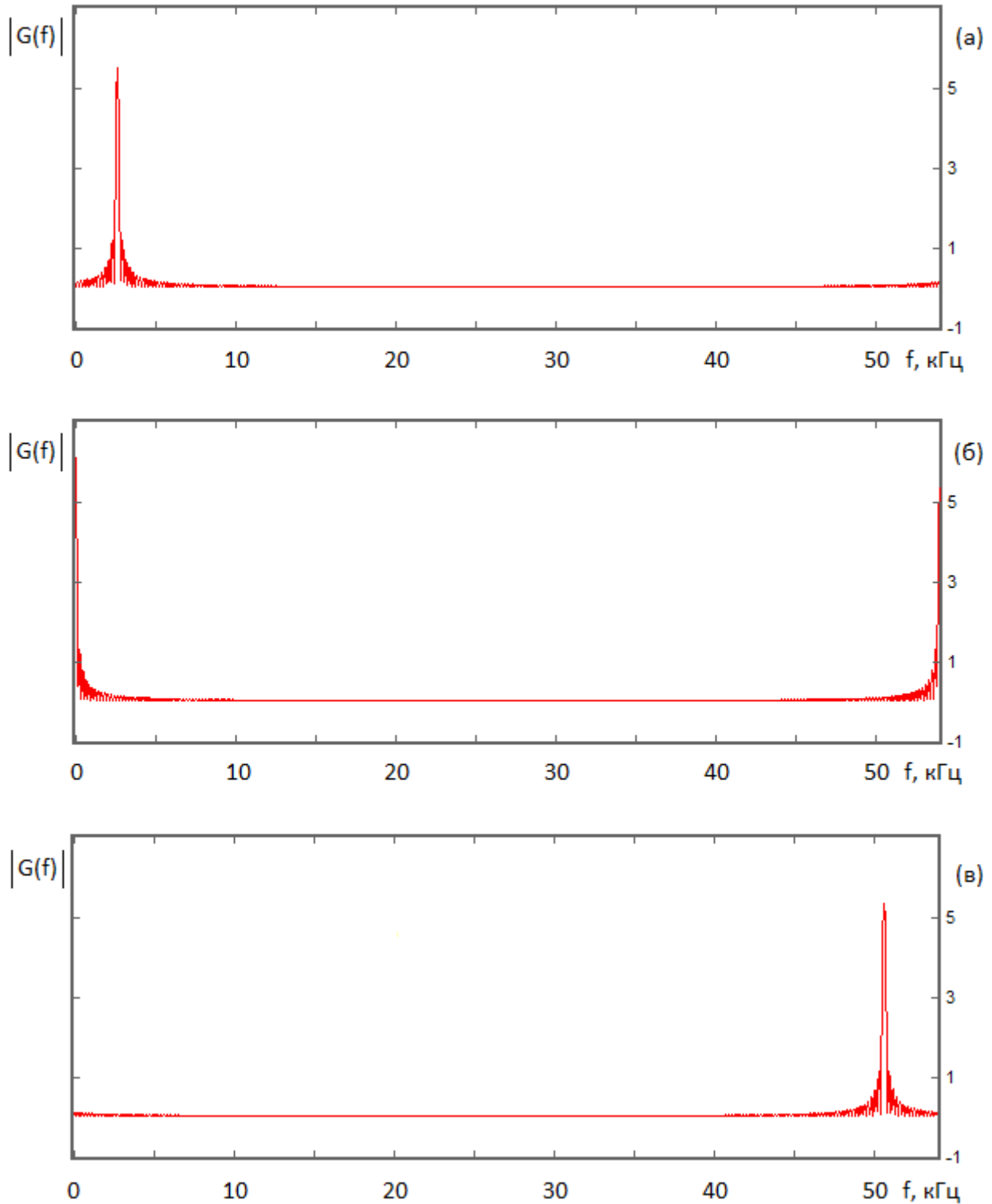


Рис. 4. Спектры модельных сигналов для различных направлений прихода.

На Рис. 5 с большей детальностью представлен график функции (5) рассчитанный для угла прихода  $\alpha = 60^\circ$ . В этом случае максимум спектра наблюдается на частоте  $f = f_0 = 2,64$  кГц. Расстояние от максимума функции

до первого нуля, определяющее разрешающую способность по угловой координате,  $\Delta f = |f - f_0| = 0,21$  кГц. Как видно из (5)  $\Delta f = 1/\tau_{12}$ .

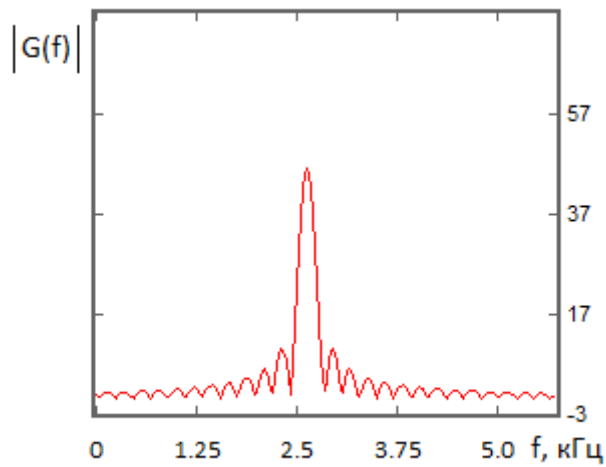


Рис. 5. Модуль спектральной плотности аналитического сигнала  $S(t)$ .

Проверка работоспособности предложенного способа измерения угловых координат на модельных данных показала возможность его применения для определения пеленга подводного аппарата. На Рис. 6. представлен график погрешности вычисления угла прихода сигнала  $\Delta\alpha_{i0} = \alpha_i - \alpha_{i0}$  в зависимости от заданного направления на объект  $\alpha_{i0}$  ( $\alpha_i$  – измеренное значение угловой координаты).

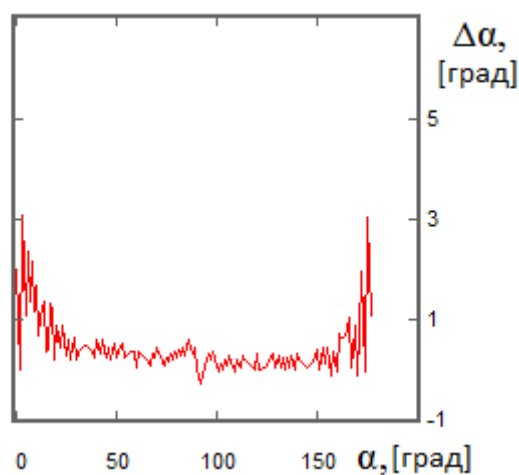


Рис. 6. Погрешность вычисления угла прихода сигнала в зависимости от направления на источник излучения.

По этим данным в диапазоне углов  $30^\circ < \alpha < 150^\circ$  среднеквадратичная погрешность измерения угловой координаты составляет  $0.26^\circ$ , а в диапазоне  $10^\circ < \alpha < 170^\circ$  она равна  $0.39^\circ$ . При добавлении к исходным данным аддитивной помехи в виде белого шума (отношение сигнал/шум  $\approx 6$ ) для углов  $30^\circ < \alpha < 150^\circ$  среднеквадратичное отклонение возрастает до  $0.38^\circ$ , а в диапазоне  $10^\circ < \alpha < 170^\circ$  до  $0.56^\circ$ . Точность вычисления угловой координаты может быть повышена более оптимальным выбором параметров ЛЧМ сигнала маяка на ПА и приемной аппаратуры на судне сопровождения.

### 3. Тестирование работы измерителя угловых координат

Для оценки возможности практического применения предложенного метода измерения угловых координат было выполнено его тестирование на экспериментальных данных, полученных при испытаниях гидролокационного комплекса в прибрежной зоне мелководного водоема. В ходе этих работ аппаратура комплекса размещались стационарно вблизи берега, а радиоуправляемый катер с установленным на нем акустическим маяком перемещался по обследуемой акватории. Излучаемый маяком ЛЧМ сигнал принимался на две разнесенные в горизонтальной плоскости на 1.5 метра антенны, обрабатывался и регистрировался для последующего анализа. При такой конфигурации антенной системы измеряемой координатой является азимутальный угол направления на мобильный объект.

На Рис. 7 в виде графиков показаны фрагменты спектров сигналов, полученные в процессе тестирования измерителя угловой координаты. Так на Рис. 7а отчетливо видна спектральная составляющая на частоте 4.32 кГц связанная с направлением прихода сигнала под углом  $\alpha = 35^\circ$ . Рис. 7б представляет пример спектра при наличии заметного многолучевого распространения сигнала. Появление в спектре ложных составляющих здесь вызвано переотражением сигнала маяка от дна и поверхности воды. При работах подводного аппарата вблизи донной поверхности это может приводить к погрешностям и ошибкам в вычислениях точного направления на объект.



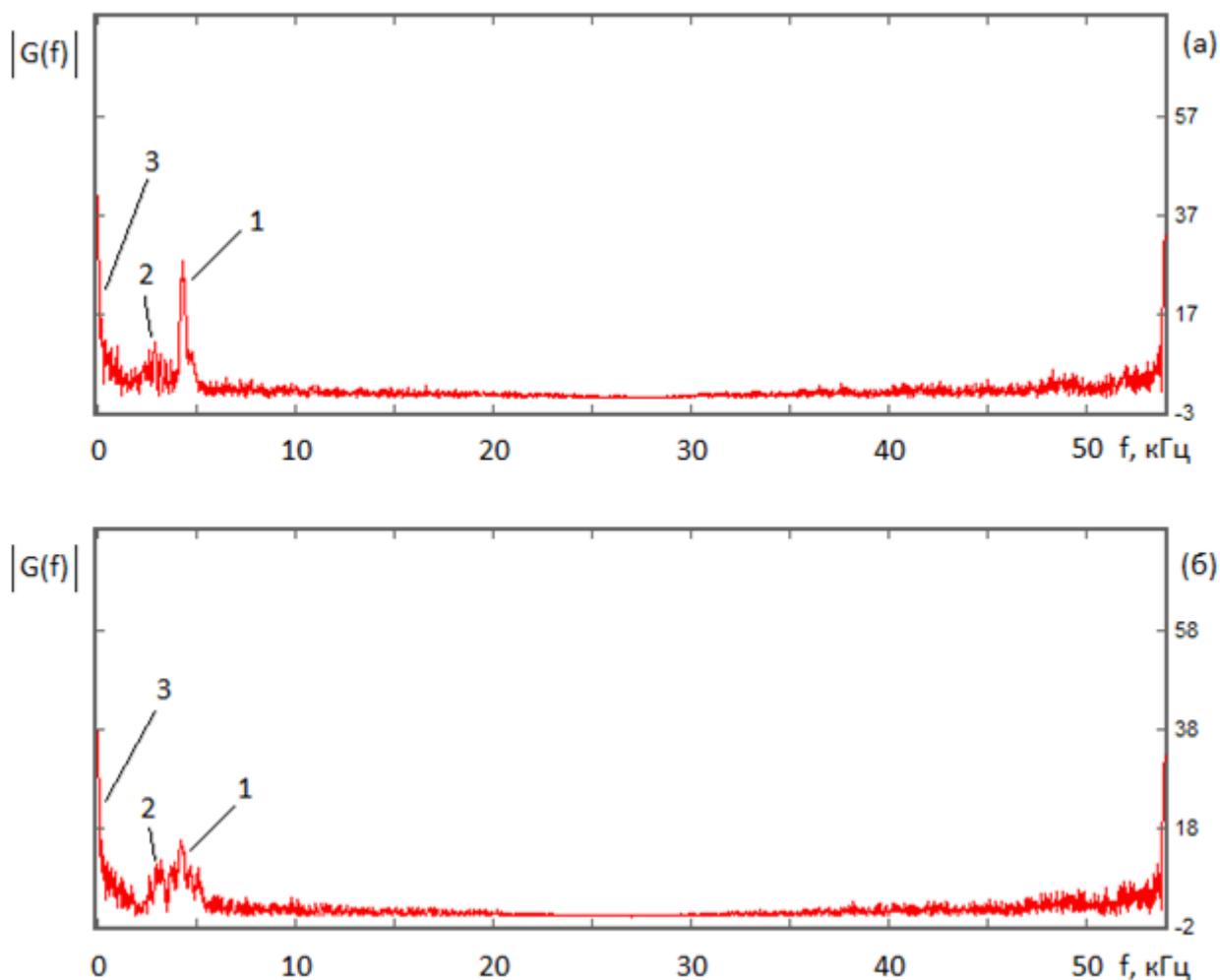


Рис. 7. Спектры экспериментальных данных: 1 – спектральная компонента сигнала маяка ПА; 2 – компоненты спектра связанные с многолучевым распространением; 3 – составляющая спектра, возникающая из-за взаимного проникновения сигналов в приемных каналах антенн  $A_1$  и  $A_2$ .

На Рис. 8 представлена яркостная картинка с отметкой углового положения акустического маяка скопированная с экрана монитора приемной аппаратуры в одном из сеансов съемки. Каждая строка представляет собой спектральную плотность мощности сигнала в зависимости от азимутального угла. Развертка по вертикали определяется номером сигнала акустического маяка. Таким образом, на картинке в виде извилистой линии представлено изменение азимутального положения катера при его перемещении по акватории водоема.

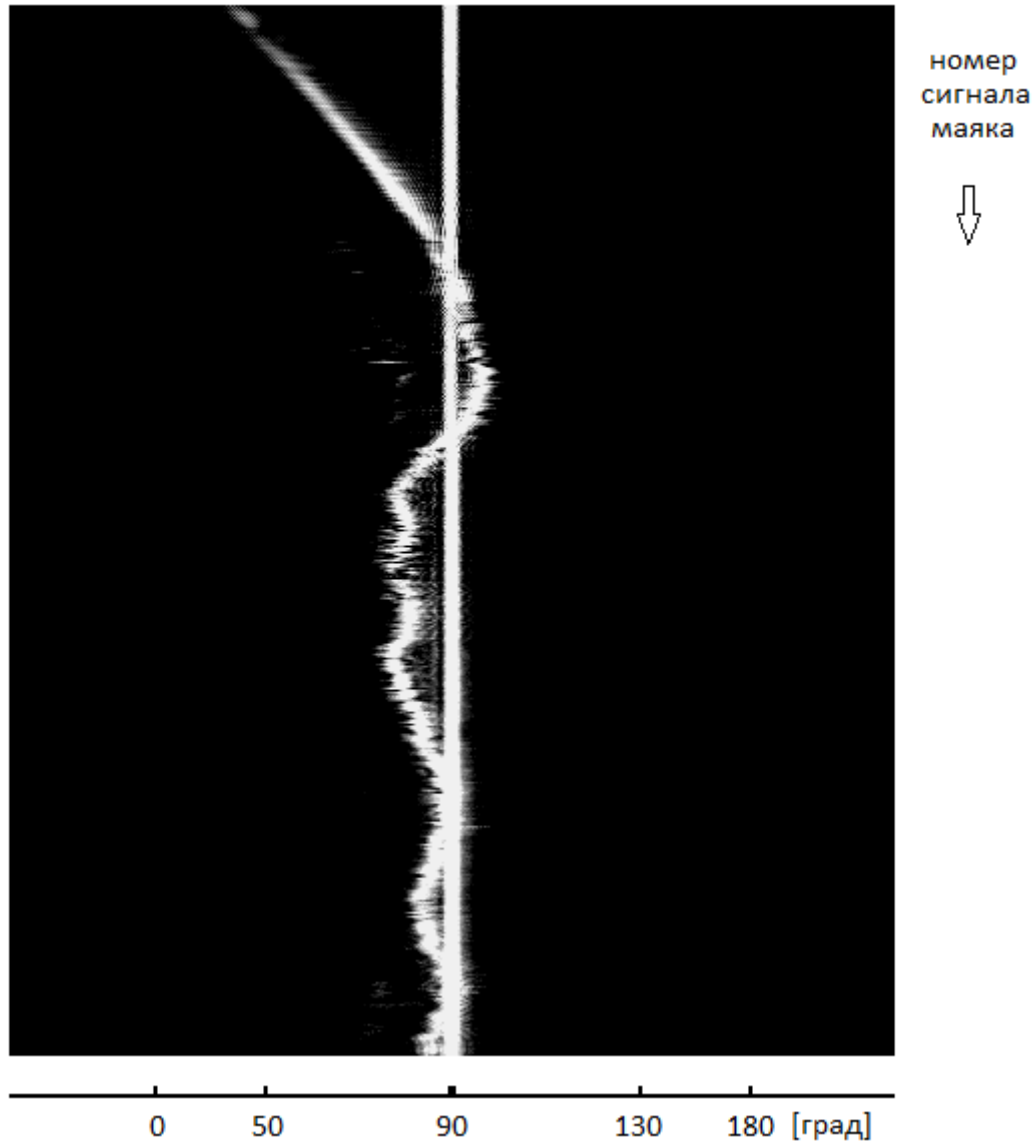


Рис. 8. Отметка углового положения акустического маяка на экране монитора приемной аппаратуры.

Следует отметить, что на графиках Рис. 7 на нулевой частоте присутствует компонента спектра, связанная с взаимным проникновением сигналов в приемных каналах антенн  $A_1$  и  $A_2$ . На Рис. 8 этот эффект проявляется в виде яркой вертикальной полосы в центре экрана для азимутального угла  $90^\circ$ . Такое взаимное влияние затрудняет определение углового положения подводного аппарата в направлении перпендикулярном линии базы интерферометра. Проявление этого аппаратного эффекта усиливается при наличии

многолучевости и может быть сведено к минимуму при хорошей развязке каналов приемной аппаратуры.

### **Заключение**

Моделирование работы и проверка на экспериментальных данных предложенного частотного способа измерения угловых координат показали возможность его применения для определения местоположения подводного аппарата с точностью, достаточной для практических целей. Так как при горизонтальном размещении приемных антенн измеряется азимутальное положение ПА, а при вертикальном - угол места, то для вычисления точного направления на объект следует использовать систему с двумя взаимно перпендикулярными базами. При наличии информации о заглублении подводного аппарата это позволяет определить дальность до него и, соответственно, вычислить его местоположение.

Существенным преимуществом представленного способа измерения угловых координат является то, что для данного измерителя не требуется жесткой синхронизации акустического маяка ПА и приемной аппаратуры на судне сопровождения. Достаточно регистрировать сигнал в течение времени его одновременного присутствия в приемных каналах антенн  $A_1$  и  $A_2$ .

Работа выполнена по государственному заданию.

### **Литература**

1. Милн П.Х. *Гидроакустические системы позиционирования*. Ленинград, Судостроение. 1989. 232 с.
2. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Локальное позиционирование подводных аппаратов гидроакустической системой с ЛЧМ зондирующими сигналами. *Журнал радиоэлектроники*: [электронный журнал]. 2018. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/14/text.pdf>.
3. Под ред. Самойло К.А. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва, Радио и связь. 1982. 528 с.

4. Под ред. Оппенгейма Э. *Применение цифровой обработки сигналов*. Москва, Мир. 1980. 552 с
5. Рабинер Л., Гоулд Б. *Теория и применение цифровой обработки сигналов*. Москва, Мир. 1978. 835 с
6. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. *Цифровая обработка сигналов*. Москва, Связь. 1979. 416 с

**Для цитирования:**

Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Частотный метод измерения угловых координат подводного аппарата гидроакустической системой локального позиционирования. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.1>