

## Разработка акустического пеленгатора

**Тихомиров А.В.\*, Иванов М.С.\*\*, Омелянчук Е.В.\*\*\***

*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», площадь Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498, Россия*

*\*e-mail: [tcs@miee.ru](mailto:tcs@miee.ru)*

*\*\*e-mail: [mikhailivanov.msk@gmail.com](mailto:mikhailivanov.msk@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [omelia81@gmail.com](mailto:omelia81@gmail.com)*

### Аннотация

В статье рассмотрен принцип работы пассивного акустического пеленгатора, определен метод вычисления временных определений, произведена оценка требуемой частоты дискретизации, необходимой для программно-аппаратной реализации цифровой части акустического пеленгатора. Значение частоты дискретизации получено в результате лабораторных измерений, выполненных на макете пеленгационного устройства акустических сигналов. Показано, что уровень развития современной компонентной базы для акустических устройств позволяет существенно уменьшить их габариты и повысить точность временных определений.

**Ключевые слова:** акустический пеленгатор, база пеленгационного устройства, временные определения, азимутальный угол, частота дискретизации.

## **Введение**

Развитие современных систем локального позиционирования идет по пути интеграции различных способов определения местоположения мобильных объектов, основанных на анализе не только радиосигналов, но и сигналов других типов, в т.ч. акустических [1-3]. Совершенствование компонентной базы для акустических устройств позволяет существенно уменьшить их габариты при сохранении точности временных определений. Совмещение акустических датчиков с блоками цифровой обработки сигналов дает возможность увеличить число одновременно анализируемых акустических каналов, тем самым, исключая влияние уровня входящих сигналов на точность определения дальности до источника звука.

Статья посвящена анализу требований к параметрам блока цифровой обработки акустических сигналов при программно-аппаратной реализации акустического пеленгатора.

### **Принцип работы акустического пеленгатора**

Для того чтобы сформулировать требования к программно-аппаратной реализации цифровой части акустического пеленгатора, необходимо уточнить, каким образом производится определение расстояния от импульсного источника звука до базы устройства.

Традиционно [4] определение расстояния осуществляется на основе анализа звуковых волн, отраженных от цели. Также известен способ определения расстояния на основе анализа звуковых волн, порождаемых целью: сначала вычисляется азимут,

а затем определяется расстояние до источника относительно пеленгационного устройства [5].

Известно несколько методов определения местоположения объектов с помощью радиосигналов (пеленгационный, дальномерный, разностно-дальномерный, пеленгационно-дальномерный), однако для анализа акустических волн, может применяться только пеленгационный метод. Указанный метод основан на вычислении азимута цели в разнесенных на расстояние базы двух пеленгационных устройств (точки «А» и «В» на рис.1).

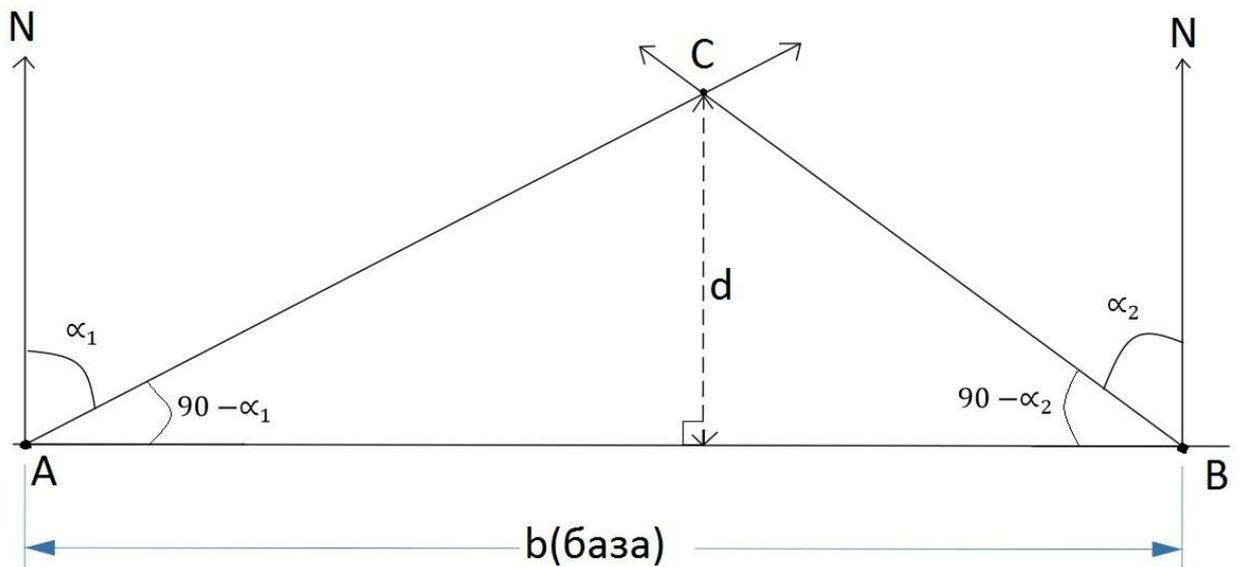


Рис. 1 – Принцип вычисления расстояния по известным азимутам источника акустических волн относительно разнесенных точек «А» и «В».

Зная величины углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а также размер базы устройства  $b$ , можно решить систему уравнений треугольника ABC:

$$\begin{cases} S_{ABC} = \frac{b^2}{2} * \frac{\sin(90-\alpha_1)*\sin(90-\alpha_2)}{\sin(180-\alpha_1-\alpha_2)} \\ S_{ABC} = \frac{d*b}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Решением системы (1) будет являться расстояние  $d$  до источника импульсных акустических сигналов.

Для определения азимута в каждой из точек потребуется система из двух акустических датчиков, разнесенных на небольшое относительно базы акустического пеленгационного устройства расстояние. Фиксируя звуковой сигнал в каждом из датчиков, можно вычислить задержку сигнала и определить разность хода звуковой волны, приходящей на каждый из датчиков:

$$r = v_{\text{звука}} * \Delta t \quad (2)$$

На рисунке 2 показан метод вычисления азимута в одном из пеленгационных устройств. При больших значениях  $b$  относительно  $A_1A_2$  (порядка 10 раз) можно пренебречь разностью углов  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  [1]. Тогда значение угла  $\alpha_1$  является решением уравнения  $\alpha_1 = 90^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{r}{A_1A_2}\right)$ .

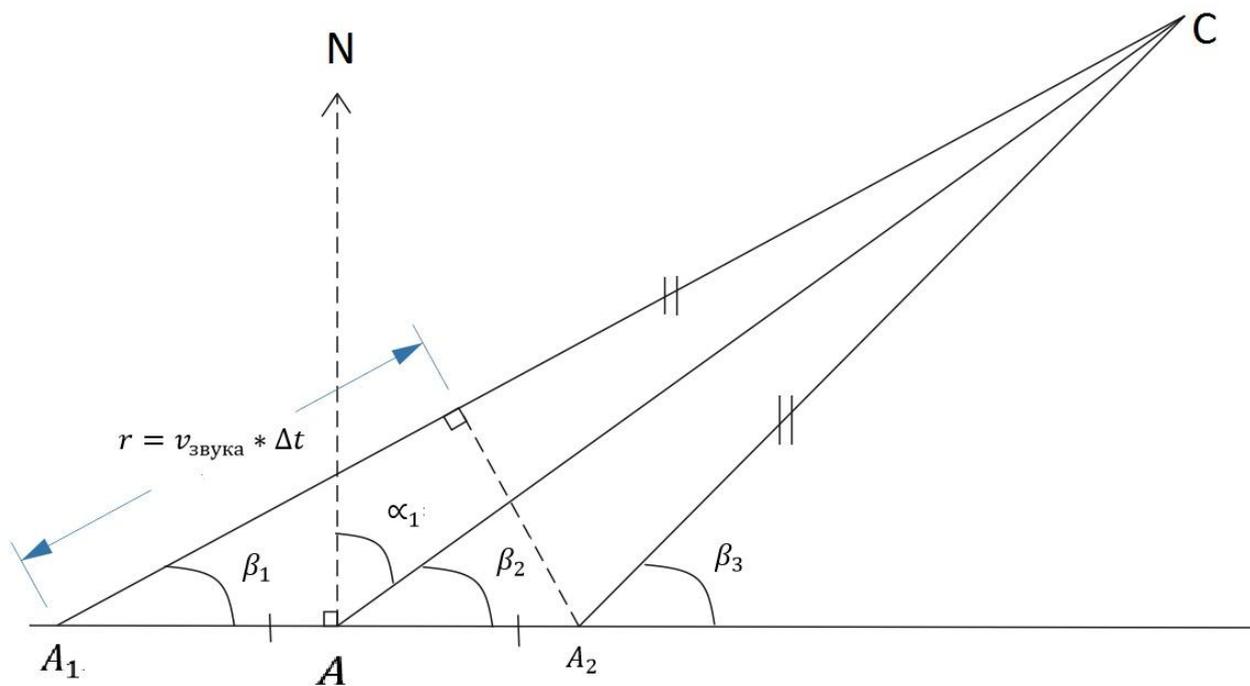


Рис. 2 – Схема определения азимута в одном из пеленгационных устройств

Таким образом, основной задачей является измерение задержки между акустическими импульсами нескольких каналов, поступающими на акустические датчики.

### **Определение требований к составу макета акустического пеленгатора**

Для разработки архитектуры макета акустического пеленгатора и уточнения его системных параметров были проведены предварительные лабораторные измерения с использованием двух акустических датчиков, расположенных на расстоянии 30 см друг от друга, и источника звуковых импульсов, находящегося на расстоянии 1,5 м от середины базы пеленгационного устройства. Для упрощения эксперимента при анализе звуковых сигналов была использована встроенная

стереозвуковая карта персонального компьютера (ПК) [6]. Сигналы с акустических датчиков поступают на вход внешней звуковой карты TASCAM US-144mkII, где происходит их обработка для отображения на мониторе ПК.

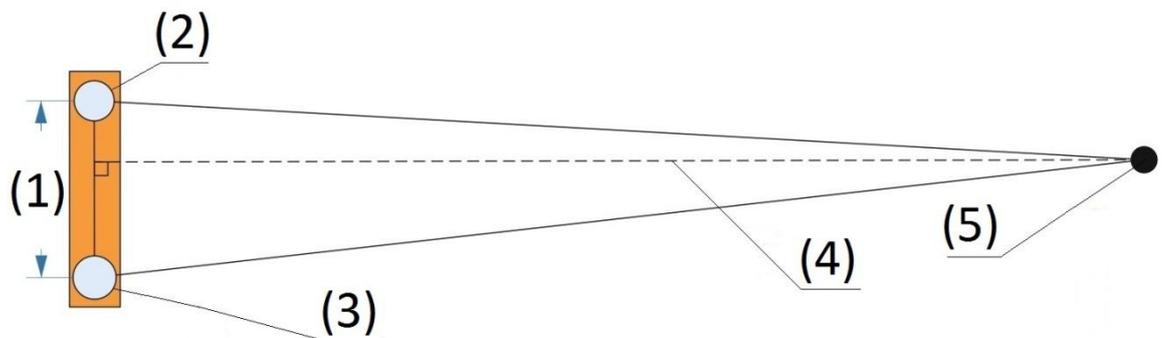


Рис. 3 – Схема лабораторных испытаний макета пеленгационного устройства (1 – база пеленгационного устройства, 2,3 – акустические датчики, 4 – расстояние от источника звука до базы пеленгационного устройства, 5 – источник звука)

Целью лабораторных испытаний является установление формы принимаемого акустического сигнала и определение требований к частоте дискретизации программно-аппаратной реализации цифровой части акустического пеленгатора. Были произведены измерения направления на источник звука при положении базы акустических датчиков под азимутальным углом  $45^\circ$  к источнику звука. На рисунке 4 показан дискретизированный акустический сигнал с каждого из датчиков, значение задержки прихода сигнала на датчик  $\Delta t$  составляет  $6e-4$  с, что соответствует значению азимутального угла  $\alpha_1 = 45^\circ$ .

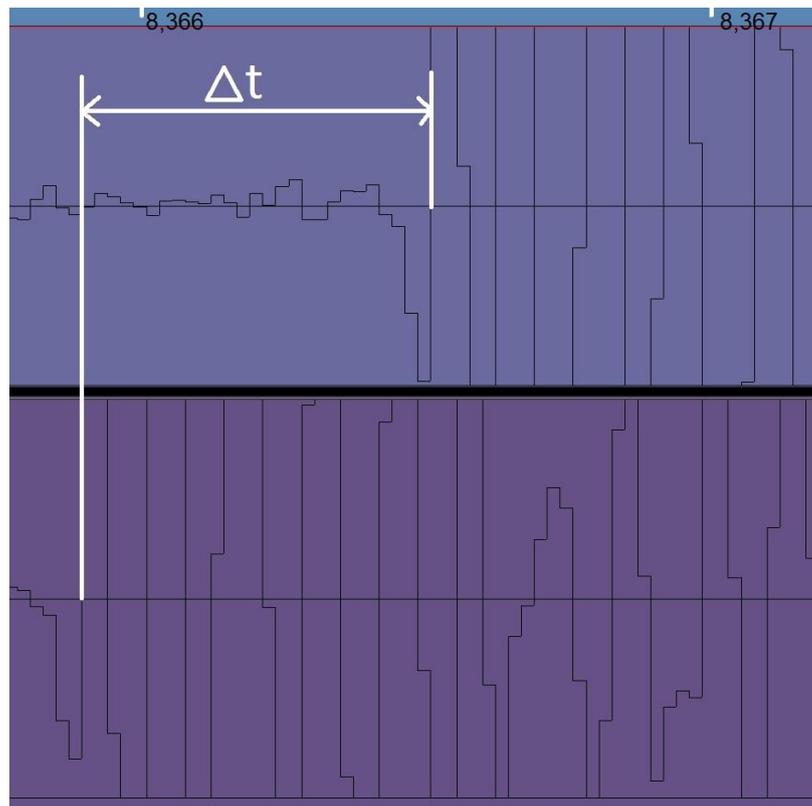


Рис. 4 – Сигнал на входах акустических датчиков при значении азимутального угла  $\alpha_1 = 45^\circ$

Зная данную задержку и скорость звука можно вычислить разность хода звуковой волны на пути до акустических датчиков:

$$r = v_{\text{звукa}} \Delta t, \quad (3)$$

где  $v_{\text{звукa}}$  – скорость звука, 330 м/с.

Для оценки точности определения азимутального угла рассмотрим два предельных случая: при определении значения задержки с точностью до периода одного оцифрованного акустического колебания и при возможности зафиксировать значение задержки с точностью до величины периода дискретизации. На основании анализа данных, представленных на рисунке 4, можно заключить, что период

колебания в среднем составляет 133 мкс, что соответствует расстоянию  $r=4,4$  см. Тогда точность определения азимутального угла составляет  $8,4^\circ$ .

Точность определения азимутального угла можно существенно повысить путем увеличения количества отсчетов на период акустического сигнала. Если установить точность определения азимутального угла  $\alpha_1$ , равную  $3^\circ$ , то значение периода дискретизации составит 33,25 мкс, что соответствует частоте дискретизации 30 кГц. Как показано в [7] значение точности по дальности при заданной точности определения азимутального угла в общем случае зависит от величины угла, под которым видна база. В рассматриваемом случае можно оценить точность по дальности как 7 м на дистанции 100 м.

На основании анализа результатов эксперимента были сформулированы требования к составу макета акустического пеленгатора, представленного на рисунке 5.

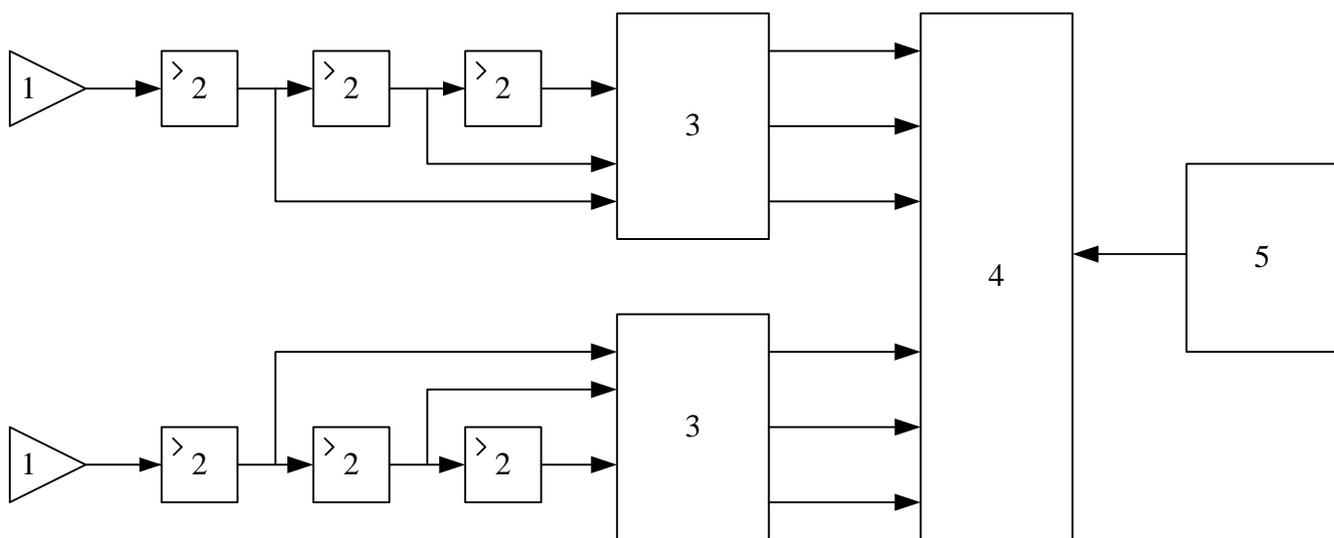


Рис. 5 – Схема макета пассивного акустического пеленгационного устройства  
(1 – акустический датчик, 2 – усилитель, 3 – блок предварительной цифровой

обработки сигналов, 4 – логическое решающее устройство, 5 – блок обработки телеметрической информации и предварительной коррекции)

Макет пассивного акустического пеленгатора состоит из набора устройств:

- двух аналоговых каналов, каждый из которых включает в себя акустический датчик (1) и усилители (2), разнесенные на расстояние, равное базе пеленгационного устройства; в свою очередь каждый из каналов делится на три подканала в соответствии с декадным разделением по коэффициенту усиления, что позволяет получить с каждого датчика три сигнала, отличающихся по амплитуде, таким образом, возможно произвести линейную корреляционную обработку поступающих сигналов;
- пространственно разнесенного блока предварительной цифровой обработки сигналов (3), поступающих с выходов усилителей;
- логического решающего устройства (4);
- блока обработки телеметрической информации и предварительной коррекции (5).

Конструкция макета позволяет вынести блок цифровой обработки сигналов за линию базы пеленгационного устройства. При этом на каждый из каналов предварительной цифровой обработки приходится два подканала:

- линейный корреляционный канал;
- канал определения задержки по порогу.

В блоке решающего устройства последовательно вырабатывается сигнал обнаружения, производится расчет азимута и идентификация объектов обнаружения.

Для увеличения точности временных определений макет акустического пеленгатора дополнен блоком обработки телеметрической информации и предварительной коррекции для учета поправок на влияние условий внешней среды: температуры, атмосферного давления, влажности воздуха и скорости ветра [8]. В состав указанного блока включены датчики давления, температуры и скорости ветра; по телеметрическим данным с этих датчиков происходит коррекция величины скорости звука, по которой в дальнейшем определяется дальность до объекта.

Конструктивное решение макета обеспечивает компромисс между уменьшением габаритов макета с одной стороны и устранением возможных отражений акустических сигналов от элементов конструкции – с другой. Следует отметить, что уровень развития современной компонентной базы для акустических устройств позволяет существенно уменьшить их габариты и повысить точность временных определений. Тем самым создаются условия для создания пеленгационных устройств, способных не только одновременно идентифицировать значительное количество объектов без потери точностных характеристик, но и работать в составе существующих радиолокационных систем [9-10] для дораспознавания объектов в условиях сложной локационной обстановки.

## **Выводы и направления дальнейшей работы**

В результате проведенных исследований были сформулированы требования к составу и системным параметрам макета акустического пеленгатора. Определено значение частоты дискретизации, при котором достигается точность определения азимутального угла не хуже  $3^\circ$ . Также рассмотрены требования к конструкции пеленгатора с точки зрения обеспечения максимально возможной точности временных определений.

Кажутся перспективными следующие направления дальнейших исследований с использованием предложенного макета акустического пеленгатора:

- поиск методов, позволяющих расширить динамический диапазон исследуемой акустической системы при сохранении указанной точности определения азимутального угла
- оценка возможности применения предложенного акустического пеленгатора в условиях пересеченной местности и сложного рельефа;
- создание базы данных масок сигналов различных объектов с целью их идентификации;
- исследование возможности интеграции предложенного акустического пеленгатора и радиолокационного устройства в едином многофункциональном модуле.

Рассмотренный принцип работы акустического пеленгационного устройства может быть применен в системах локального позиционирования робототехнических

комплексов, устройствах сигнализации охранных систем, системах обнаружения беспилотных летательных аппаратов.

### Библиографический список

1. Зайцев Н.А., Платов А.В., Потапов В.А. Радиолокационные станции разведки наземных движущихся целей. Современный уровень и основные направления развития // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2014. № 1. С. 41-44.
2. Бурага А.В., Костюков В.М. Сравнительный анализ пассивных методов измерения дальности для малого беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ, 2012, №53 <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29624>
3. Малышев А.В., Семенова А.Ю., Омельянчук Е.В. Обзор технологий позиционирования мобильных объектов в реальном времени // Наука. Технологии. Производство. 2014. № 3. С. 115-118.
4. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. – М.: Радио и связь, 1986. – 280 с.
5. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы. – М.: Советское радио, 1968. – 460 с.
6. Агеев И.М., Рыбин Ю.М., Бубнова М.Д. Устройство сбора данных на основе звуковой карты персонального компьютера // Труды МАИ, 2011, №48: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=27115>

7. Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю., Тихомиров А.В. Определение местоположения мобильных объектов в условиях напланетного базирования // Материалы III Всероссийской Микроволновой Конференции, Москва, 2015, С. 261-265.
8. Таланов А.В. Звуковая разведка артиллерии. - М.: Воениздат МВС СССР, 1948. – 398 с.
9. Тимошенко А.Г., Бахтин А.А., Тепляков И.М., Моленкамп К.М., Волков А.С. Ориентирование группы мобильных роботов // Материалы Всероссийской конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», Москва, РУДН, 18–22 апреля 2016, pp.119–121.
10. Бахтин А.А., Белоусов Е.О., Ломовская К.М., Тимошенко А.Г. Актуальные задачи построения систем связи для напланетных и орбитальных станций // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. № 5. С. 74-81