Выводы.

1. Выделение величины полезно используемой теплоты в системах отопления зданий позволил создать метод комплексной оценки эффективности всей системы централизованного теплоснабжения.
2. Наиболее слабым звеном в СЦТ, существенно снижающим её КПД, являются потребитель тепловой энергии и тепловые сети, выполняющие две функции: транспортную и распределительную.
3. Возникающие проблемы при распределении теплоты между абонентами, приводят к переотапливанию ряда зданий, располагаемых как правило ближе к источнику теплоснабжения. Дополнительно подводимая к отдельному зданию теплота невелика, однако суммарное количество такой теплоты, подаваемой во все переотапливаемые здания может достигать 20 – 30 % от нагрузки котельной, что и объясняет повышенное потребление топлива в системах централизованного теплоснабжения.

1. Гершкович В. Ф. Сто пятьдесят..... Норма или перебор? // Новости теплоснабжения № 5. М., 2005. С. 42-47.
2. Гладышев Н. Н. Ресурсосберегающие технологии в системах централизованного теплоснабжения ЖКХ: монография // ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2020.

Драченко В.Н.¹, Михнюк А.Н.², Каххоров З.Б.²

Оценка скорости звука и взаимной ориентации кольцевых антенных решеток в процессе функционирования

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

²Российский университет дружбы народов
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/trnio-11-2021-56

Аннотация

Описан метод оценки скорости звука на апертуре антенн и взаимной ориентации кольцевых антенных решеток в натуральных морских условиях по сигналам внешнего источника. Метод основан на специфических особенностях кольцевых решеток. Приведены обоснование метода и результаты, демонстрирующие работоспособность данного метода, полученные при численном моделировании.

Ключевые слова: скорость звука, сложный широкополосный сигнал, согласованная фильтрация, оценка времен прихода.

Abstract

A method is described for estimating the speed of sound on the aperture of antennas and the mutual orientation of ring antenna arrays in marine conditions. This method is based on the specific features of ring arrays. A mathematical description of the method and the results demonstrating the performance of this method, obtained by numerical simulation, are given.

Keywords: sound velocity, complex broadband signal, matched filtering, arrival time estimate.

Одним из перспективных путей построения зональных систем освещения подводной обстановки (СОПО) является создание распределенных комплексов, состоящих из множества расположенных в толще волновода относительно недорогих станций, перекрывающих своими зонами обзора значительные площади. По очевидным причинам приемные антенные решетки отдельных станций подобных комплексов удобно реализовать в виде кольцевых антенных решеток (КАР), состоящих из приемных элементов

ненаправленных в горизонтальной плоскости и направленных в вертикальной. К задачам, требующим решения в процессе функционирования таких станций, относятся их динамическое взаимное позиционирование и определение текущих локальных значений требуемых гидрофизических параметров, используемых в ходе пространственно-временной обработки и влияющих на ее эффективность. Эти задачи обычно решаются путем включения в состав станций соответствующих подсистем, что усложняет конструкцию станций и удорожает ее.

Из требующих измерения параметров наиболее актуальными являются ориентация в горизонтальной плоскости и текущее значение скорости звука в области апертуры антенны.

В данной работе рассмотрен способ, позволяющий реализовать оценку скорости звука на антеннах СОПО и их взаимную ориентацию в процессе функционирования при использовании КАР.

Обсуждаемый способ основывается на размещении в зоне покрытия СОПО вспомогательного излучателя (ВИ) сложного сигнала и соответствующей обработке сигналов принятых антеннами, входящими в состав СОПО. Период излучения, определяется необходимой периодичностью проведения измерений. Заметим, что в качестве вспомогательного излучателя можно использовать штатные излучатели в составе СОПО при условии их наличия.

Неточное задание величины скорости звука снижает эффективность пространственно – временной обработки. Влияние этих ошибок иллюстрирует трехмерный график, приведенный на рисунке 1. На этом графике изображена зависимость углового отклика КАР от ошибки задания значения скорости звука в процентах от ее истинного значения в нескольких проекциях.

Рисунок 1. Зависимость углового отклика КАР от ошибки задания значения скорости звука

Источник при расчетах здесь располагался в направлении 180^0 . Как видно из представленного графика, направление основного лепестка отклика остается неизменным, а его величина существенно уменьшается с увеличением ошибки при практически неизменной величине боковых лепестков в широком диапазоне ошибок задания скорости звука.

Воспользуемся последним обстоятельством и покажем, что при достаточном значении отношения сигнал/помеха (ОСП) на КАР оценка направления на источник несмещенная и не зависит от скорости звука. Здесь подразумевается оценка направления, полученная только по временам прихода сигнала на приемники КАР описанная ниже.

Рассмотрим реакцию КАР на сложный сигнал известной формы. Предположим, что сложность используемых сигналов позволяет после сжатия этих сигналов согласованным фильтром разделить сигналы, приходящие по разным лучам. Как показано в [1] это несложно осуществить в условиях реального эксперимента. Необходимая мощность в этом случае существенно снижается по сравнению с использованием короткого импульса для оценки импульсной переходной функции [2].

Найдя максимумы выхода согласованного фильтра, получим оценки времен прихода сигнала по разным лучам на каждый из приемников антенны. Будем считать, что мы идентифицировали сигналы, приходящие на отдельные приемники КАР по разным лучам и выделили наиболее энергонесущие. По этим сигналам и будем производить обработку.

Поскольку обработка идентичная для каждого из лучей, ее можно производить независимо по каждому из них. Обозначим $\hat{t}_i$ ($i = 1, \dots, N$) полученные оценки времен прихода на приемники по анализируемому лучу.

Знание геометрии приемной антенны позволяет оценить угол прихода сигнала в горизонтальной плоскости путем минимизации среднеквадратичного отклонения оцененных времен от расчетных по углу:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N [\hat{t}_i - t_i(\beta)]^2. \quad (1)$$

Для расчетных относительных времен прихода имеем:

$$t_i(\beta) = \frac{r}{c} \cos(\beta - \varphi_i) \cos \theta, \quad (2)$$

где φ_i – направления на приемники КАР,

r – радиус КАР,

c – задаваемое при обработке значение скорости звука,

θ – задаваемый при обработке угол прихода рассматриваемого луча в вертикальной плоскости.

Для значений оцененных времен прихода имеем:

$$\hat{t}_i = \frac{r}{c_0} \cos(\beta_0 - \varphi_i) \cos \theta_0 + \Delta t_i, \quad (3)$$

где c_0 – истинное значение скорости звука,

β_0 и θ_0 – истинное значение углов прихода рассматриваемого луча в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно,

Δt_i – ошибки оценок времен прихода, которые в нашем случае распределены нормально с нулевым средним [3].

Геометрия задачи схематически представлена на рисунке 2.

Рисунок 2. Геометрия задачи.

Найдем минимум выражения (1) и соответствующий ему угол, вычислив производную от суммы квадратов невязок и приравняв ее нулю:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta} \left(\sum_{i=1}^N (\hat{t}_i - t_i(\beta))^2 \right) &= \frac{d}{d\beta} \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{r \cos \theta_0}{c_0} \cos(\beta_0 - \varphi_i) + \Delta t_i - \frac{r \cos \theta}{c} \cos(\beta - \varphi_i) \right)^2 \right) = \\ &= \sum_{i=1}^N 2 \left(\frac{r \cos \theta_0}{c_0} \cos(\beta_0 - \varphi_i) + \Delta t_i - \frac{r \cos \theta}{c} \cos(\beta - \varphi_i) \right) \frac{r \cos \theta}{c} \sin(\beta - \varphi_i) = 0. \end{aligned}$$

После несложных преобразований получим:

$$\frac{c \cos \theta_0}{c_0 \cos \theta} \sum_{i=1}^N 2 \cos(\beta_0 - \varphi_i) \sin(\beta - \varphi_i) - \sum_{i=1}^N 2 \cos(\beta - \varphi_i) \sin(\beta - \varphi_i) + \sum_{i=1}^N \frac{2 \Delta t_i}{(r \cos \theta / c)} \sin(\beta - \varphi_i) = 0.$$

После преобразования произведения тригонометрических функций:

$$\frac{c \cos \theta_0}{c_0 \cos \theta} \sum_{i=1}^N \sin(\beta - \beta_0) + \frac{c}{c_0} \sum_{i=1}^N \sin(\beta + \beta_0 - 2\varphi_i) - \sum_{i=1}^N \sin(2\beta - 2\varphi_i) + \sum_{i=1}^N \frac{2\Delta t_i}{(r \cos \theta / c)} \sin(\beta - \varphi_i) = 0.$$

Для кольцевых антенных решеток при одинаковом расстоянии между соседними приемниками имеем: $\varphi_i = i \cdot \alpha$, где α – угол между двумя соседними приемниками. С учетом этого:

$$\begin{aligned} & \frac{c \cos \theta_0}{c_0 \cos \theta} \sum_{i=1}^N \sin(\beta - \beta_0) + \frac{c}{c_0} \sum_{i=1}^N \sin(\beta + \beta_0 - 2(i-1)\alpha) - \sum_{i=1}^N \sin(2\beta - 2(i-1)\alpha) + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{2\Delta t_i}{(r \cos \theta / c)} \sin(\beta - \varphi_i) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее применим выражение для суммы синусов, полученное с применением формулы Эйлера [4]:

$$\sum_{k=1}^n \sin(a + k\varphi) = \frac{\sin \frac{n\varphi}{2} \sin\left(a + \frac{(n+1)\varphi}{2}\right)}{\sin \frac{\varphi}{2}}.$$

В итоге для второй и третьей суммы в (4) получаем:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sin(\beta + \beta_0 - 2i\alpha) &= \frac{\sin(N\alpha) \sin(\beta + \beta_0 - (N+1)\alpha)}{\sin \alpha}, \\ \sum_{i=1}^N \sin(2\beta - 2i\alpha) &= \frac{\sin(N\alpha) \sin(2\beta - (N+1)\alpha)}{\sin \alpha}. \end{aligned}$$

Так как $N\alpha = 2\pi$, то указанные суммы равны нулю при $N > 2$ и не зависят от значения β и β_0 .

Следовательно, выражение (4) для оценки аргумента минимума среднеквадратичного отклонения оцененных времен от расчетных примет вид:

$$\frac{c \cos \theta_0}{c_0 \cos \theta} \sum_{i=1}^N \sin(\beta - \beta_0) + \sum_{i=1}^N \frac{2\Delta t_i}{(r \cos \theta / c)} \sin(\beta - \varphi_i) = 0$$

или

$$\sin(\beta - \beta_0) = -\frac{2}{N(r \cos \theta_0 / c_0)} \sum_{i=1}^N \Delta t_i \sin(\beta - \varphi_i). \quad (5)$$

Из (5) видно, что получаемая оценка направления прихода сигнала не зависит от скорости звука и угла прихода луча в вертикальной плоскости используемых при расчете модельных времен $t_i(\beta)$.

Несложно показать, что математическое ожидание правой части (5) равняется нулю:

$$M\left[\frac{2}{N(r \cos \theta_0 / c_0)} \sum_{i=1}^N \Delta t_i \sin(\beta - \varphi_i)\right] = \frac{2}{N(r \cos \theta_0 / c_0)} M[\Delta t_i] \cdot \sum_{i=1}^N \sin(\beta - \varphi_i) \equiv 0.$$

Таким образом, получаем

$$M[\sin(\beta - \beta_0)] = 0.$$

Из последнего выражения следует, что оценка направления прихода сигнала является несмещенной.

Кроме того нетрудно видеть, что даже выборочное значение правой части выражения (5), особенно при значительном числе приемников N , будет пренебрежимо мало.

В случае, когда расстояние между ВИ и КАР достаточно велико, углы скольжения энергонесущих лучей близки к нулю [5], и в приведенных выше выражениях можно считать, что $\cos \theta = \cos \theta_0 = 1$.

Тогда выражение (2) переписывается как

$$t_i(\beta) = \frac{r}{c} \cos(\beta - \varphi_i). \quad (6)$$

Оценив направление прихода сигнала можно уточнить значение искомой скорости звука

$$\Phi_1(c) = \sum_{i=1}^N [\hat{t}_i - t_i(\beta)]^2 = \sum_i \left[\hat{t}_i^2 - 2 \frac{\hat{t}_i r}{c} \cos(\beta - \varphi_i) + \frac{r^2}{c^2} \cos^2(\beta - \varphi_i) \right].$$

$$\frac{d\Phi_1}{dc} = \sum_i \left[2 \frac{\hat{t}_i r}{c^2} \cos(\beta - \varphi_i) - 2 \frac{r^2}{c^3} \cos^2(\beta - \varphi_i) \right] = 0.$$

Из последнего получим:

$$\hat{c} = \frac{r \sum_i \cos^2(\beta - \varphi_i)}{\sum_i \hat{t}_i \cos(\beta - \varphi_i)}. \quad (7)$$

Преобразовав выражение (7) с учетом (3) получим:

$$\hat{c} = \frac{c_0 \sum_i \cos^2(\beta - \varphi_i)}{\cos \theta_0 \sum_i [\cos(\beta_0 - \varphi_i) + \Delta t_i] \cos(\beta - \varphi_i)}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что полученная оценка скорости звука является несмещенной оценкой искомой скорости звука на апертуре КАР (эффективной горизонтальной скорости звука).

Исходя из всего вышесказанного, алгоритм оценки текущей эффективной горизонтальной скорости звука можно сформулировать следующим образом.

1. Из принятых КАР сигналов выделяется отрезок реализации, содержащий пришедшие сигналы от внешнего излучателя.
2. В каждом из приемных каналов производится согласованная фильтрация, выделение наиболее энергонесущего луча и определение времени его прихода.
3. По определенным временам производится оценка направления прихода сигнала излучателя.
4. По оцененному направлению прихода определяется эффективная горизонтальная скорость звука при прохождении аперттуры КАР.
5. В случае уверенного выделения других лучей пункты 2 – 4 можно повторить и для них.

При известных координатах установки каждой КАР и ВИ несложно определить их ориентации в горизонтальной плоскости по известным направлениям на ВИ. Для наглядности на рисунке 3. представлена геометрия задачи определения текущей ориентации для трех КАР. Из рисунка 3 видно что, алгоритм определения ориентации по известным направлениям на ВИ, тривиален и далее не обсуждается.

Рисунок 3. Расстановка КАР и ВИ

Интерес представляет необходимый уровень излучения ВИ для решения поставленной задачи на значительной площади. Для предварительной оценки необходимого уровня были проведены расчеты в предположении обеспечения значения ОСП на одиночном приемнике КАР не менее 5 дБ. Расчеты проводились при следующих условиях: приведенный к 1 кГц уровень шумов моря – $0.001 \text{ Па/Гц}^{0.5}$, затухание – 0.025 дБ/км , полоса частот – от 1 до 4 кГц.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов для двух законов спада уровня поля: цилиндрического и сферического.

Рисунок 4. Зависимость от предельной дистанции требуемой амплитуды излучаемого сигнала при цилиндрическом (слева) и сферическом (справа) законах спада поля

Из приведенных графиков следует, что даже при сферическом законе давление 1700 Па обеспечивает решение задачи на площади более $31\,000 \text{ км}^2$. В реальных условиях необходимое значение давления будет находиться в области между приведенными кривыми. Создание подобного излучателя не является чрезмерно сложной задачей и представляется возможным даже в автономном варианте с достаточно большим сроком автономности.

Для проверки обсуждаемого метода оценки скорости звука было проведено численное моделирование. Расчеты производились для одного луча, принимаемого КАР диаметром 2 м с числом приемников 64. Излучаемый сигнал представлял собой импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с полосой 3 кГц и длительностью 0.2 с, приходящий с направления 190° . Истинная скорость звука на апертуре КАР была принята равной 1459 м/с , а задаваемая при расчетах – 1490 м/с . Помеха моделировалась в виде белого шума, независимого по приемникам КАР.

Результаты моделирования, полученные при различном значении ОСП на одиночном приемнике, приведены в таблице 1. На рисунке 5 изображены графики нормированных угловых откликов на принятый сигнал при различном значении исходного ОСП.

Рисунок 5. Угловые отклики на принятый сигнал

На каждом из графиков здесь изображены два отклика: полученный при использовании задаваемой в расчетах скорости звука (1490 м/с) синим цветом и полученный при использовании полученной оценки ($\hat{c}$) красным. В надписи над каждым графиком приведены значения исходного ОСП на одиночном приемнике. Как видно из приведенных графиков, использование при формировании откликов полученной оценки скорости звука приводит к снижению уровня боковых лепестков.

Таблица 1

Результаты, полученные при моделировании

ОСП, дБ	Направление	Скорость звука, м/с	Увеличение КК, %
-40	189.86°	1442.4	4.8
-20	189.90°	1453.0	4.9
0	190.02°	1457.4	4.3
20	190.01°	1459.8	4.3
40	190.00°	1458.9	4.3
Без помехи	190.00°	1459.0	4.2

В таблице 1 приведены следующие величины: заданное при моделировании ОСП на одиночном приемнике; оценка направления прихода сигнала, полученная с помощью выражения (1); оценка эффективной горизонтальной скорости звука, полученная с помощью выражения (7); увеличение коэффициента концентрации КАР, при использовании полученной оценки скорости звука вместо значения 1490 м/с.

Как видно из приведенных результатов, при всех значениях моделируемого ОСП метод показал хорошую работоспособность. Полученные значения оценок скорости звука близки к истинным, и во всех случаях использование этих оценок приводит к повышению помехоустойчивости КАР.

Следует отметить, что относительно небольшое приращение коэффициента концентрации обусловлено тем, что при численном моделировании начальная скорость звука отличалась от истинного значения лишь на 2%. На рисунке 6 приведен график зависимости коэффициента концентрации от относительной ошибки скорости звука, полученный для вышеописанной КАР при отсутствии помехи.

Рисунок 6. Зависимость коэффициента концентрации от относительной ошибки скорости звука

Из приведенного графика видно, что коэффициент концентрации уменьшается на 8% при относительной ошибке скорости звука в 3%. При дальнейшем увеличении данной ошибки коэффициент концентрации резко снижается. При относительной ошибке скорости звука 8% коэффициент концентрации падает более чем на 50%.

Выводы

Показано, что получаемая оценка направления прихода сигнала в горизонтальной плоскости является несмещенной и не зависит от скорости звука задаваемой при проведении расчетов. Данное обстоятельство позволяет определить это направление и использовать полученное значение при оценке эффективной горизонтальной скорости звука на апертуре КАР.

Полученное в результате оценки значение скорости звука является тем, которое и требуется задавать при проведении пространственной обработки – вычислении отклика КАР в горизонтальной плоскости при плосковолновой модели распространения звука.

Проведенное численное моделирование подтвердило работоспособность предложенного метода в широком диапазоне значений отношения сигнал-помеха.

Вспомогательный излучатель относительно небольшой мощности может обеспечить решение поставленной задачи в акватории существенных размеров.

1. Драченко В. Н., Михнюк А. Н., Якутов И. Н. Калибровка приемных антенных решеток в морских условиях. // Датчики и системы № 1 (232), январь 2019, С. 22-28
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.
3. Гуткин Л. С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. ГЭИ, 1961.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А., Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
5. Кузнецов Г. Н., Лебедев О.В., Степанов А.Н., Вертикальная амплитудно-фазовая структура низкочастотного акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 699–711.

Колтаков А.А., Харламов А.Ю., Копейкин В.Н., Козявин Ю.А.

Методика расчета резиновых виброизоляторов для установок, где источником вибрации являются элементы вращения, учитывающая их динамические характеристики и требуемую эффективность виброизоляции

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
(Россия, Воронеж)*

doi: 10.18411/trnio-11-2021-57

Аннотация

В статье представлена методика расчета виброизоляторов для установок, источником вибрации в которых являются элементы вращения. Методика учитывает динамические характеристики эластомеров, а также показатель эффективности виброизоляции.

Ключевые слова: вибрация, расчетная частота, динамический модуль упругости, эффективность виброизоляции, жесткость виброизолятора.

Abstract

The article presents a method for calculating vibration isolators for installations, the source of vibration in which are elements of rotation. The method takes into account the dynamic characteristics of elastic materials, as well as an indicator of vibration efficiency.

Keyword: vibration, design frequency, dynamic modules of elasticity, vibration isolation efficiency, vibration isolator stiffness.