

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА В РЕЖИМЕ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

И.М. Рудько

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: igor-rudko@mail.ru

Ключевые слова: пассивная локация, определение координат, задачи обнаружения.

Аннотация: Рассматривается алгоритм определения траектории подвижных объектов по их шумовому излучению в режиме пассивной локации. Вначале решается задача обнаружения энергетическим приемником подвижного объекта по дискретным составляющим его шумоизлучения, затем по результатам замеров с трех энергетических приемников определяется пеленг на цель и методом двух пеленгов решается триангуляционная задача определения координат цели.

1. Введение

В настоящее время актуальность приобрела задача определения траектории подвижных объектов (ПО), таких как корабли, самолеты, вертолеты, БПЛА и морские БПА. Одним из источников информации о наличии ПО является его акустическое поле (шум). Низкочастотный диапазон акустического поля является наиболее значимым, так как в энергетическом спектре этого диапазона наблюдаются узкие локальные максимумы – дискретные составляющие (ДС), обусловленные работой винта и лопастей винта, несущие информацию о типе и режиме работы движителя ПО, количестве лопастей у винта и т. д., на основании которой возможно определить параметры их движения.

ДС, обусловленные вращением винтов, проявляются на частотах, кратных основной гармонике. На низких частотах, как правило, ширина ДС существенно меньше, чем на высоких. Часто ДС, возбуждаемые от одного и того же источника, бывают синхронизированы между собой и образуют звукоряды (ЗР), т.е. наборы ДС, частоты которых кратны между собой (гармоники).

Характеристикой, описывающей ДС шума акустических целей, является их спектральная плотность мощности (СПМ). Относительная полоса СПМ каждой отдельной ДС (или ДС, входящих в состав ЗР, образованного одним общим источником) является постоянной величиной. Эффективная ширина полосы (ЭП) ДС является линейной функцией ее центральной частоты $\Delta f_3 = \beta f_1$. Соответственно, ЭП каждой k -й гармоники в звукоряде также является линейной функцией частоты: $\Delta f_{3k} = k\beta f_1$, а общая СПМ всего звукоряда из K ДС обладает масштабными (мультипликативными) свойствами в области частоты. Пример СПМ шума ПО представлен на Рис.1. СПМ представляет суперпозицию ряда ДС и непрерывной части СПМ, имеющей спад частотной характеристики -6 дБ/октаву, и принимаемой на фоне широкополосного шума, также имеющего спад частотной характеристики -6 дБ/окт. При обнаружении ДС и широкополосный шум и непрерывная часть СПМ ПО – помеха, маскирующая ДС.

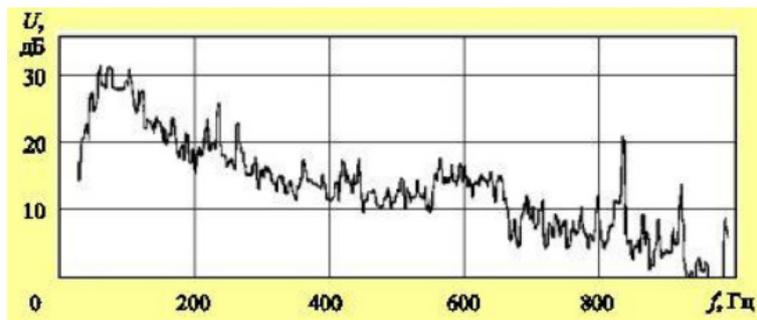


Рис. 1 Пример СПМ шума ПО.

2. Определение координат подвижного объекта

Алгоритм обнаружения ДС предполагает следующую последовательность операций:

- широкополосная полосовая фильтрация (для формирования общего частотного диапазона) в полосе ΔF и «отбеливающий» фильтр, преобразующий СПМ помехи в белый шум в полосе ΔF ;
- многоканальная узкополосная полосовая фильтрация (формирование отдельных частотных каналов), т.е. дискретное преобразование Фурье (БПФ) реализации на отрезке длительности T_0 ;
- квадратичное детектирование, т.е. расчет энергетического спектра;
- интегрирование, т.е. накопление энергетических спектров по N реализациям;
- определение порога обнаружения α по правилу Неймана-Пирсона при задаваемой вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ и сравнения с порогом (в каждом частотном канале).

Операция обнаружения – это задача проверки двух статистических гипотез: нулевой гипотезы H_0 , когда данные относятся только к шуму (непрерывной части СПМ шумоизлучения), и альтернативной гипотезы H_1 , когда данные относятся к совместному воздействию сигнала (ДС) и шума. Этот алгоритм описывает многоканальный энергетический приемник. В случае превышения порога в каком либо канале принимается решение об обнаружении ДС и, следовательно, об обнаружении ПО [1].

Стандартная процедура сравнения с порогом подразумевает фиксированное время наблюдения. Но возможен и другой алгоритм принятия решения – фиксируется порог по накоплению энергии, а решение принимается по времени превышения этого порога (больше или меньше заданного). Этот алгоритм реже применяется из-за более сложной реализации, но позволяет, например, определить координаты ПО.

Рассмотрим метод определения координат ПО по результатам замеров с трех приемников. Он основан на измерениях временных разностей между приходом звука, идущего от ПО к каждому из приемников. Эта разница во времени может быть оценена путем вычисления разницы во времени, которая максимизирует взаимную корреляционную функцию между сигналами во временной области для каждой пары приемников. Таким образом, исходными параметрами являются координаты 3-х приемников (x_i, y_i) и задержки во времени прихода сигнала от ПО к двум из трех приемников Δt_i , относительно одного из них (опорного) – (см. рис. 2). Можно установить систему уравнений, решение которой является оценкой неизвестного положения ПО.

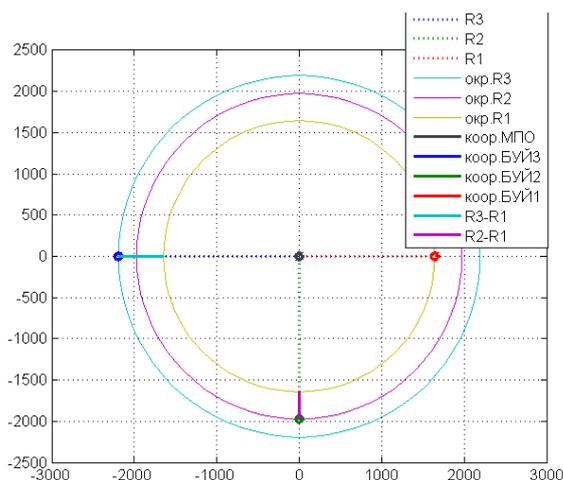


Рис. 2. Вариант взаимного положения ПО и приемников.

Позиция цели может быть найдена путем решения нелинейной системы уравнений:

$$(1) \quad \begin{cases} (x_1 - x_0)^2 - (y_1 - y_0)^2 = R_1^2 \\ (x_2 - x_0)^2 - (y_2 - y_0)^2 = R_2^2 \\ (x_3 - x_0)^2 - (y_3 - y_0)^2 = R_3^2 \end{cases}$$

где x_i, y_i – координаты 3-х приемников, x_0, y_0 – координаты ПО, R_i – не известное расстояние от i -го приемника до МПО. Пусть R_1 – минимальное из этих расстояний. Тогда $R_2 = R_1 + \Delta R_2$, а $R_3 = R_1 + \Delta R_3$, где $\Delta R_2 = c\Delta t_2$ и $\Delta R_3 = c\Delta t_3$, c – скорость звука, Δt_2 и Δt_3 – известные параметры. Очевидно, что для расчета взаимной корреляционной функции необходимо передавать в вычислительный блок сигналы со всех приемников за все время наблюдения T_0 . По результатам расчетов взаимных корреляционных функций оцениваются задержки Δt_2 и Δt_3 [2]. Это условие существенно усложняет аппаратуру передачи данных и обработки.

Система (1) может быть преобразована в линейную систему из 3-х уравнений:

(2)

$$\begin{cases} 2x_0(x_1 - x_2) + 2y_0(y_1 - y_2) = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + \Delta R_2^2 + 2\Delta R_2 R_1 \\ 2x_0(x_1 - x_3) + 2y_0(y_1 - y_3) = x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 + \Delta R_3^2 + 2\Delta R_3 R_1 \\ 2x_0(x_2 - x_3) + 2y_0(y_2 - y_3) = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 - \Delta R_2^2 + \Delta R_3^2 - 2(\Delta R_2 - \Delta R_3)R_1 \end{cases}$$

Но ее определитель или очень мал или равен нулю. Линейная система может быть решена, если учесть, что каждое уравнение системы описывает прямую линию. Поэтому, если взять любые 2 уравнения этой системы и решить её 2 раза при заданных и различных R_1 – (r_1 и r_2), получим координаты 2-х точек, принадлежащих прямой, проходящей через координаты ПО, – (x_{r1}, y_{r1}) и (x_{r2}, y_{r2}) , т.е. определяем пеленг на ПО.

Для определения координат ПО (x_0, y_0) необходимо определить 2 пеленга на ПО, т.е. нужно еще 3 приемника. В некоторых случаях можно использовать еще один (четвертый) приемник, который с двумя приемниками из предыдущей тройки образует новую тройку приемников, позволяющую определить еще одну прямую, проходящую через координаты ПО (x_0, y_0) – второй пеленг. Найдя точку пересечения этих двух прямых, определяем координаты ПО (x_0, y_0) . Таким образом, при использовании рассматриваемого метода, необходимо, чтобы меньшей мере 4 приемника одновременно «слышали» ПО.

Возможен и другой способ оценки задержек Δt_2 и Δt_3 . Если в алгоритме принятия решения (энергетическом приемнике) фиксируется порог по величине накопленной энергии, а решение принимается по времени превышения этого порога, то это время за счет разницы во времени распространения сигнала на дистанции будет различным для каждого приемника – $T_j = f(R_j)$. С другой стороны, это время зависит от величины порога, т.е. от вероятности ложной тревоги $P_{лт} - T_j = \varphi(P_{лт})$. При построении траектории движения ПО время разового наблюдения T_n ограничивается условием, что пеленг и дистанция до ПО за T_n меняются мало и, следовательно, отношение сигнал/помеха $\rho \approx const$. Поэтому накопленная энергия будет прямо пропорциональна времени наблюдения $T_n - E = \gamma T_n$. (см. рис. 3) Здесь t_1 – время превышения порога для 1-го приемника, t_2 – для 2-го приемника, t_3 – для 3-го приемника. $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ и $\Delta t_3 = t_3 - t_1$.

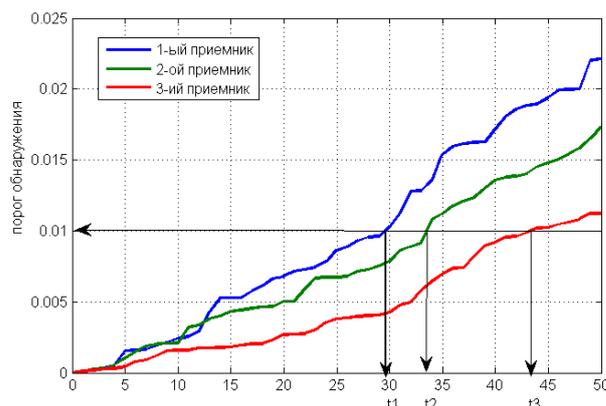


Рис. 3. Пример решения задачи обнаружения для трех приемников.

В линейной системе уравнений (2) последнее слагаемое $\Delta R_i R_j$ можно представить в виде $\Delta R_i R_j = (\delta \Delta r_i) R_j = \Delta r_i (\delta R_j)$, где $\Delta r_i = c \Delta t_i$ – задержка по времени для i -го приемника относительно опорного, δ – коэффициент пропорциональности между Δr_i и ΔR_i , рассчитанному по взаимной корреляционной функции. Таким образом, δ можно учитывать как коэффициент при R_j , который задается как фиктивный параметр и не влияет на направление пеленга. На рис. 4 приведен пример вычисления пеленга с разными δ . Видно, что координаты (x_{r1}, y_{r1}) и (x_{r2}, y_{r2}) находятся на пеленге, а расстояние между ними изменяется пропорционально δ .

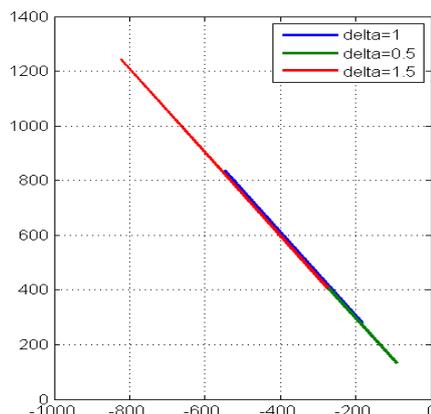


Рис. 4. Пеленг при различных коэффициентах пропорциональности δ .

Ниже приведены результаты моделирования при условии, что ПО движется равномерно и прямолинейно, а приемники установлены с точным знанием их координат. На рис.5а – точно известны координаты 3-х приемников (x_i, y_i) и задержки во

времени прихода сигнала от ПО к двум из трех буев Δt_i , относительно одного из них (опорного). На рис.5б приведен пример, когда координаты 3-х приемников (x_i, y_i) и задержки во времени прихода сигнала от ПО к двум из трех буев Δt_i , относительно одного из них (опорного), оцениваются с ошибкой.

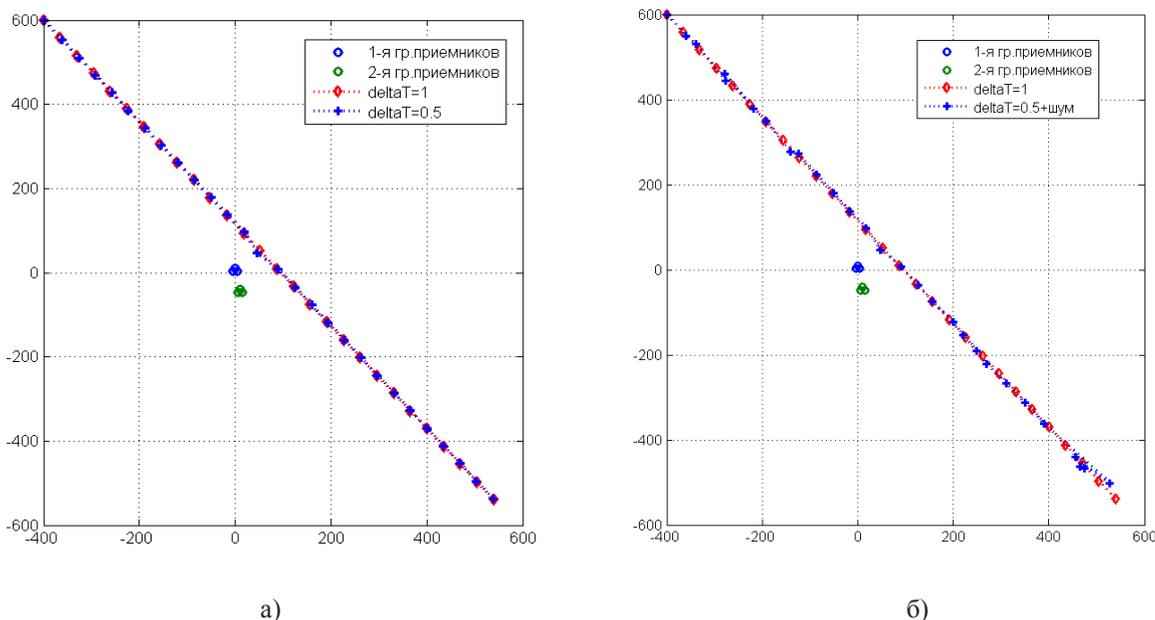


Рис. 5. а). Траектория МПО и ее оценки при точном знании параметров модели, б). Траектория МПО и ее оценки при неточном знании положения буев.

3. Заключение

Для расчета пеленга по трем приемникам важно только соотношение $dt = \Delta t_i / \Delta t_j$ и не важно каким способом оно получено. Использование в качестве оценки Δt_i оценок времени накопления на выходе интегратора энергетического приемника позволяет исключить из алгоритма оценки пеленга на ПО расчет взаимной корреляционной функции и упростить канал передачи данных, т.к. в этом случае не надо передавать весь широкополосный сигнал, а достаточно передавать в вычислительный блок дискретные значения оценок t_i .

Список литературы

1. Рудько И.М. Алгоритм обнаружения звукорядов в спектре шумоизлучения морских судов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 62. С. 76–84. doi: 10.17223/19988605/62/8.
2. Wahlstedt A., Fredriksson J., Jored K., Svensson P. Submarine Tracking by Means of Passive Sonobuoys // FOA-R-96-00386-505-SE. April 1997.