

ОЦЕНКА ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

А.В. Буренин В.В. Диденко

В данной работе представлена методика оценки доплеровского смещения частоты зондирующего сигнала. Методика базируется на применении сигнального пакета, состоящего из идентичных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами, и операции «свертки» принятого сигнала с самим собой на приемнике. Приведены результаты экспериментальной апробации методики, проведенной 17 августа 2013 года. Полученные натурные данные сравниваются с измерениями системы GPS и алгоритмами оценки доплеровского смещения.

Ключевые слова: эффект Доплера, оценка доплеровского смещения, сложные сигналы, М-последовательность на несущей, ЛЧМ-сигналы, автокорреляция.

Введение

Сложные сигналы на основе М-последовательностей получили широкое применение как в радиотехнике (беспроводная связь, измерение дистанции, определение географических координат и т.д.), так и в гидроакустике. Уникальные свойства М-последовательностей [1, 2] позволили с помощью операции корреляции («свертки») оценивать как импульсную, так и частотную характеристику канала – морского волновода (ИХК, ЧХК) с требуемым временным и частотным разрешением. В задачах звукоподводной связи [3–7], как правило, используют сигнальный пакет, состоящий из сложного сигнала на основе М-последовательности, с помощью которого измеряется импульсная или частотная характеристика канала и сигнала данных, в котором с помощью измеренных ИХК, ЧХК и алгоритма декодирования восстанавливают передаваемую информацию. Устройство, выполняющее операцию корреляции («свертки»), принято называть коррелятором или согласованным фильтром, а результат расчета корреляции – откликом и выходом коррелятора или согласованного фильтра. С другой стороны, измеренные ИХК и ЧХК несут информацию о том, каким образом неоднородности среды искажают распространяющийся от источника к приемнику сигнал. Эта информация позволяет разрабатывать и успешно применять методы и тех-

нические средства, решающие прикладные задачи: гидроакустическое позиционирование и навигацию [8], акустическую томографию океана [9].

Сложные сигналы на основе М-последовательностей оказались весьма чувствительными к эффекту Доплера, особенно в морской среде, где скорость относительного движения источник–приемник близка к скорости распространения волны [1]. Как результат применение операции «свертки» излучаемого сложного сигнала к подвергнутому влиянию эффекта Доплера принятому сигналу не позволяет измерить ИХК и ЧХК.

Решая эту проблему, научно-исследовательские сообщества стали применять либо громоздкие методы для оценки влияния эффекта Доплера, требующие значительных вычислительных ресурсов и энергетических затрат [3–6], либо составные сигнальные пакеты, в которых вместе со сложным сигналом на основе М-последовательностей располагается «пробный» сигнал или группа сигналов [7]. Как правило, параметры «пробных» сигналов и методы их обработки предварительно согласовывались с ожидаемыми предельными величинами относительной скорости движения источник–приемник и скоростью распространения звуковой волны.

Для автономных подводных аппаратов и иных систем, имеющих ограниченный запас энергии, решение прикладных задач связано с минимизацией

потребляемой энергии, необходимой для излучения, регистрации и обработки сигналов. Поэтому задачи разработки способов снижения вычислительной и энергетической нагрузки и, одновременно, повышения способности сигнального пакета оценивать сразу несколько физических параметров являются актуальными и приоритетными.

В последнее время в качестве «пробного» сигнала стали активно применять сложные сигналы на основе линейной частотной модуляции (ЛЧМ) [10]. Параметры (частотную полосу W и длительность T) ЛЧМ-сигнала можно задать таким образом, чтобы он был «устойчивым» к эффекту Доплера. Именно эта способность к «устойчивости» сделала ЛЧМ-сигнал привлекательным для решения этих задач. В работе [11] предложен алгоритм дополнительной амплитудной модуляции ЛЧМ-сигнала, который позволяет при обработке на приемной стороне с помощью коррелятора получить на выходе значения временного разрешения и отношения сигнал/шум, близкие к значениям, полученным с помощью сложных сигналов на основе М-последовательности. Техническая реализация данного подхода для одновременного решения задач термометрии и навигации представлена в работе [12]. Также разработан и апробирован способ цифровой звукоподводной связи, основывающийся на применении ЛЧМ-сигналов [13].

В данной работе представлена методика оценки доплеровского смещения, которая базируется на использовании сигнального пакета, состоящего из сложных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами и операции автокорреляции. В качестве сложных сигналов могут выступать и сложные сигналы на основе М-последовательности, полученные с помощью фазовой манипуляции, и ЛЧМ-сигналы. Приведены результаты экспериментальной апробации и сопоставления с другими акустическими методиками оценки доплеровского смещения частоты.

■ Краткое описание эффекта Доплера

Распространяясь от источника к приемнику, сигнал подвергается влиянию эффекта Доплера, вызванного взаимным движением источника и/или приёмника. Эффект Доплера заключается в изменении несущей частоты сигнала

$$f' = (1 + \Delta) f_0, \quad (1)$$

здесь f_0 – несущая частота сигнала; f' – частота сигнала, смещенная эффектом Доплера;

$\Delta = v/C$ – величина, которая выполняет функцию масштабирующего множителя; v – относительная скорость движения источник–приемник и C – скорость распространения звука. Используя равенство $\Delta f = f_0 - f'$, (1) можно преобразовать (1) еще к одному виду: $\Delta f = (v/C) f_0$.

Данная работа посвящена использованию сложных сигналов, основная энергия которых лежит не на одной частоте f_0 , а распределяется на конечном частотном отрезке (частотной полосе W_0). Под несущей, или центральной, частотой сложного сигнала, как правило, понимается центр тяжести спектра сложного сигнала. При влиянии эффекта Доплера на сложный сигнал вместе с несущей частотой смещается и частотная полоса W' . Если в спектральной области выполнить наложение друг на друга излученного W_0 и принятого смещенного эффектом Доплера W' сложных сигналов (вычислить взаимную энергию $E(W_0, W')$), то их спектры будут не совпадать, а лишь пересекаться общими областями. Поэтому значение взаимной энергии излученного и принятого сложного сигнала без воздействия эффекта Доплера $E(W_0, W)$ будет больше, чем с влиянием эффекта Доплера $E(W_0, W')$. Этот факт имеет важное значение для понимания операции «свертки», которая в частотной области эквивалентна расчету взаимной энергии излученного и принятого сложных сигналов.

Так как в работе не будут детально рассматриваться формы спектров различных сложных сигналов, то термины «спектр» и «частотная полоса» будут использоваться как синонимы. Необходимо отметить, что при влиянии эффекта Доплера на различные сложные сигналы частотная полоса может не только линейно смещаться на значение Δf , но и сжиматься или растягиваться. Эти эффекты в данной работе рассматриваться не будут.

Во временной области изменение частоты сигнала эквивалентно изменению длительности сигнала (эффект временного сжатия–растяжения):

$$\Delta = \frac{T_s}{T_r} - 1 \text{ или } T_r = \frac{1}{1 + \Delta} T_s, \quad (2)$$

где T_s – длительность излученного сигнала, T_r – длительность принятого сигнала после воздействия эффекта Доплера.

Таким образом, с помощью измерения длительности сигнала на приемнике T_r и сопоставления её с T_s можно оценить значение масштабирующего множителя Δ .

■ Методики оценки и компенсации эффекта Доплера

А. Функция неопределенности

Данная методика оценки доплеровского смещения базируется на расчете функции взаимной неопределенности (ФВН) [1] между принятым $r(t)$ и излученным $s(t)$ сигналами:

$$\chi_{sr}(\tau, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) r^*(t - \tau) e^{i2\pi f_n t} dt, \quad (3)$$

где $*$ – операция комплексного сопряжения, τ – сдвиг по времени между сигналами, f_n – дискретное значение доплеровского сдвига частоты или частота n -го доплеровского канала.

Так как далее будет множество раз встречаться «базовая» математическая операция «свертка» (расчет функции корреляции) с различными переменными, то для упрощения записи введем следующие обозначения: $R_{sr}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) r^*(t - \tau) dt = s(t) \otimes r(t)$, а операция изменения несущей (центральной) частоты сигнала (временное сжатие–растяжение)

$r(t) e^{i2\pi f_n t} = r(t, f_n) = r_n(t)$, более детальное описание подходов для реализации этой операции представлено в работах [3–7]. Тогда (3) можно записать более компактно:

$$\chi_{sr}(\tau, f_n) = s(t) \otimes r_n(t). \quad (4)$$

Определение ФВН выполняется в пределах предусмотренного доплеровского интервала, ширина которого определяется с учетом максимальной относительной скорости движения источник/приемник v_{MAX} и скорости распространения звука C . Максимальное необходимое количество выборок по оси доплеровского смещения частоты сигнала в пределах предусмотренного доплеровского интервала равно $2N+1$, где N рассчитывают по

формуле $N = (v_{MAX}/C)(f_0/\Delta f_s)$, здесь $\Delta f_s = 1/T_s$ – разрешение по частоте сложного сигнала; T_s – длительность сложного сигнала. Так как эффект Доплера может как увеличивать, так и уменьшать несущую частоту сложного сигнала, то отдельные доплеровские «сечения» равны $f_n = f_0 + n \times \Delta f_s$, где $n = [-N, -(N-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (N-1), N]$. Таким образом, в обработке на приемной стороне участвует набор из $2N+1$ параллельных корреляторов, каждый из которых соответствует отдельному доплеровскому «сечению» ФВН f_n . В каждом корреляторе выполняется операция «свертки» принятого сигнала и излученного. При этом каждый отдельный коррелятор может быть сформирован из:

1) преобразованных в соответствии с различными доплеровскими «сечениями» f_n копиями излучаемого сигнала и неизменным принятым сигналом [3, 6] $\chi_{sr}(\tau, f_n) = s_n(t) \otimes r(t)$;

2) преобразованных в соответствии с различными доплеровскими «сечениями» f_n копиями принятого сигнала и неизменным излучаемым сигналом [4, 5] $\chi_{sr}(\tau, f_n) = s(t) \otimes r_n(t)$.

Для определения доплеровского сдвига частоты сигнала выбирается коррелятор, который на выходе дает наибольший максимум, т.е. в котором частотная полоса спектра излученного и принятого сигнала имеет максимальную область пересечения:

$$O(\tau', f') = \max[\chi_{sr}(\tau, f_n)], \quad (5)$$

здесь τ' – временное смещение принятого сигнала относительно излученного; f' – искомое доплеровское смещение частоты излученного сигнала (рис. 1).

Недостатком данного метода является затрата значительных вычислительных ресурсов, так как для того чтобы произвести вычисление ФВН в ожидаемом диапазоне изменения доплеровского смещения

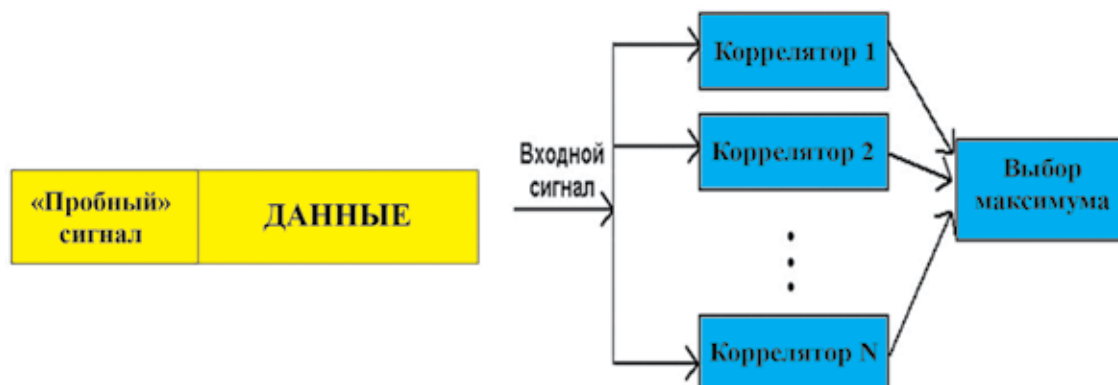


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета функции неопределенности

частоты сигнала с необходимым разрешением по доплеровскому смещению частоты сигнала, требуется значительное количество корреляторов [6, 7].

Б. Измерение длительности принятого сигнального пакета с помощью «устойчивого» к эффекту Доплера ЛЧМ-сигнала

Оригинальный способ измерения доплеровского смещения, основанный на использовании формулы (2), был предложен в работе [7]. Для измерения длительности принятого сигнала T_r и последующего сопоставления с длительностью излученного сигнала T_s авторы предлагают использовать сигнальный пакет следующего вида:

$$s(t) = [x_{\text{ЛЧМ}}(t), x_{\text{инф}}(t), x_{\text{ЛЧМ}}(t)]. \quad (6)$$

В начале и в конце пакета размещают устойчивый к эффекту Доплера ЛЧМ-сигнал $x_{\text{ЛЧМ}}(t)$, а в середине информационный $x_{\text{инф}}(t)$. Обработка на приемной стороне такого пакета заключается в вычислении «свертки» принятого пакета $r(t)$ с $x_{\text{ЛЧМ}}(t)$:

$$R_{\text{ЛЧМ}}(\tau) = r(t) \otimes x_{\text{ЛЧМ}}(t). \quad (7)$$

Затем вычисляется временной интервал между пиками (рис. 2). Временной интервал между пиками $R_{\text{ЛЧМ}}$ равен сумме длительности одного ЛЧМ-сигнала и длительности информационного сигнала, которая умножена на масштабирующий множитель $1/(1 + \Delta)$, отвечающих за эффект временного сжатия–растяжения. Обозначим операцию вычисления временного интервала между пиками (идентификация): $T_r = TI[R_{\text{ЛЧМ}}(\tau)]$. Таким образом, сопоставив значения T_s и T_r , можно оценить масштабирующий множитель Δ , используя (2).

Далее, для устранения эффекта Доплера в принятом сигнальном пакете группа авторов работы [7] пересчитывает частоту дискретизации принятого сигнала

$$F'_s = (1 + \Delta)F_s \quad (8)$$

(здесь F_s – частота дискретизации на приемнике, Δ – масштабирующий множитель) и изменяет $r(t)$ в соответствии с новой F'_s с помощью операции линейной интерполяции, обозначим её $\bar{r}(t) = LI_{\Delta}[r(t)]$.

Основными недостатками данного способа являются: использование для измерения доплеровского смещения частоты исключительно ЛЧМ-сигналами, помещенными в начале и в конце сигнального пакета, и обработки на приемнике с помощью операции свертки сигнального пакета с одиночным ЛЧМ-сигналом. Успешная реализация такого алгоритма за-

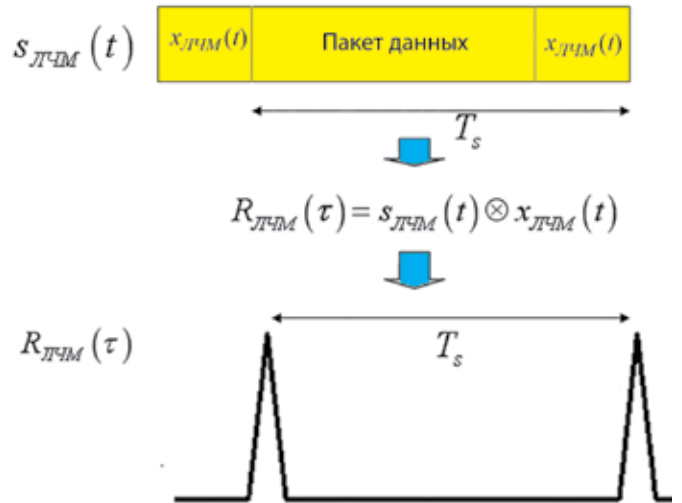


Рис. 2. Блочная форма сигнального пакета; базовая математическая операция «свертки» сигнального пакета $s(t)$ и ЛЧМ-сигнала $x_{\text{ЛЧМ}}(t)$ при обработке; результат операции «свертки» (взаимной корреляции)

висит от предварительно подготовленных и согласованных параметров ЛЧМ-сигнала с ожидаемым максимальным доплеровским смещением частоты, которые зависят от v_{MAX} и C . К недостаткам также можно отнести тот факт, что при обработке на приемнике с помощью операции «свертки» используется не вся энергия принятого сигнала, а лишь та, которая определяется площадью пересечения спектров излученного и принятого сигнала. Как следствие:

во-первых, результат применения операции «свертки» излученного и измененного эффектом Доплера принятого ЛЧМ-сигнала будет меньше по амплитуде, чем результат применения операции «свертки» излученного и не измененного эффектом Доплера принятого сигнала;

во-вторых, возникает необходимость компенсации смещения времени распространения сигнала от источника к приемнику, вызванного влиянием эффекта Доплера и формой функции неопределенности ЛЧМ-сигнала [10].

ЛЧМ-сигнал имеет приемлемое разрешение по времени, но уровень боковых лепестков по амплитуде относительно основного максимума достаточно высокий, поэтому качество оценки импульсной характеристики канала с помощью ЛЧМ-сигналов и операции «свертки» низкое. Это означает, что в сигнальный пакет, состоящий из ЛЧМ-сигнала и информационного сигнала, должен входить сигнал, измеряющий импульсную характеристику канала, что ведёт к увеличению длительности сигнального пакета, а вместе с ней и увеличению энергетических и вычислительных затрат на излучение и обработку.

В. Измерение длительности принятого пакета с помощью сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами

В данной работе представлена методика, которая базируется на оценке доплеровского смещения с помощью измерения длительности принятого сигнала (2), но без применения операции «свертки» принятого сигнала с излученным, и использовании в пакете «устойчивых» к эффекту Доплера ЛЧМ-сигналов.

В общем виде методика базируется на использовании составного сигнального пакета $s_N(t)$, состоящего из $N=2,3,\dots$ сложных сигналов $x(t)$ с «хорошими» автокорреляционными свойствами, произвольно расположенных в пакете, и применении операции «свертки» принятого сигнала с самим собой. Под «хорошими» автокорреляционными свойствами подразумевается форма автокорреляционной функции, которая имеет один узкий пик при нулевом смещении по временной оси и незначительные по амплитуде боковые «лепестки» при иных смещениях. Данная методика разрабатывалась специально для сигналов, не являющихся «устойчивыми» к эффекту Доплера, а именно для сигналов, несущая частота которых фазоманипулирована М-последовательностью (такие сигналы еще называют М-последовательностью на несущей [2]). Но принцип действия методики может быть использован для других типов сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами, например, сложных сигналов, сгенерированных с помощью частотной (ЛЧМ-сигналы [10], частотные сигналы на основе М-последовательности [1]) или фазовой модуляции/манипуляции [1, 2]. Результаты обработки ЛЧМ-сигналов по этой методике будут продемонстрированы ниже.

Для примера функционирования методики рассмотрим самый простой случай для двух М-последовательностей на несущей. Пусть сигнальный пакет $s_n(t)$ состоит из $n=2$ М-последовательностей на несущей $x(t)$, тогда структуру этого сигнального пакета можно записать следующим образом: $s_2(t) = [x(t), x(t)]$. Если вычислить «свертку» пакета с самим собой (автокорреляционную функцию)

$$R_{ss}(\tau) = s_2(t) \otimes s_2(t), \quad (9)$$

то она будет представлять собой два значительных пика, разнесенных друг от друга на временной интервал T_s равный длительности одного сложного сигнала $x(t)$ (рис. 3).

Таким образом, измерить длительность сигнала T_r на приемной стороне можно с помощью вычисления автокорреляции принятого пакета

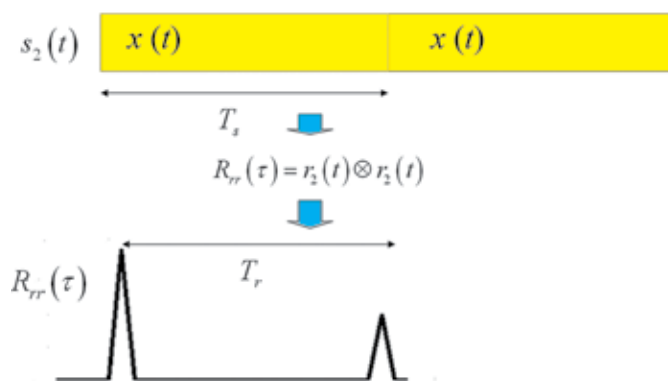


Рис. 3. Блочная форма сигнального пакета; базовая математическая операция «свертки» сигнального пакета $r_2(t)$ с самим собой при обработке на приёмнике; результат операции «свертки» сигнального пакета с самим собой (форма функции автокорреляции)

$$R_{rr}(\tau) = r_2(t) \otimes r_2(t), \quad (10)$$

где $r_2(t)$ – принятый сигнальный пакет, и поиска временного интервала между пиками $T_r = TI[R_{rr}(\tau)]$.

Используя (2), можно оценить масштабирующий множитель Δ и доплеровское смещение. Устранение доплеровского смещения осуществляется аналогично [7]: $\bar{r}_2(t) = LI_{\Delta}[r_2(t)]$. Далее, «освобожденный» от эффекта Доплера принятый сигнальный пакет $\bar{r}_2(t)$ может быть использован для вычисления ИХК и ЧХВ [2].

■ Описание эксперимента

Эксперимент проводился на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН (м. Шульц) 17 августа 2013 г. Приемник был установлен в одном метре от дна при глубине моря 10 м и на расстоянии 50 м от берега. В качестве излучателя использовался цилиндрический пьезокерамический излучатель. Характеристики излучателя позволяют работать с широкополосными сигналами на центральной частоте 2 кГц. Излучатель был свешен с яхты, которая перемещалась по заданной траектории в течение всего эксперимента. Географические координаты траектории движения регистрировались системой GPS. Для того чтобы точка излучения держалась на одном горизонте, излучатель был снабжен крылом. Измерения проводились в течение 2 часов.

На рис. 4, а представлена схема эксперимента. Вертикальные профили скорости звука, представленные на рис. 4, б, были измерены в точках, указанных зелеными ромбами на рис. 4, а, в начале и в конце эксперимента. Для каждого сигнального пакета яхта двигалась по траектории треугольника (на удаление от приемника; параллельно приемнику; навстречу приемнику). Используя данные системы GPS,

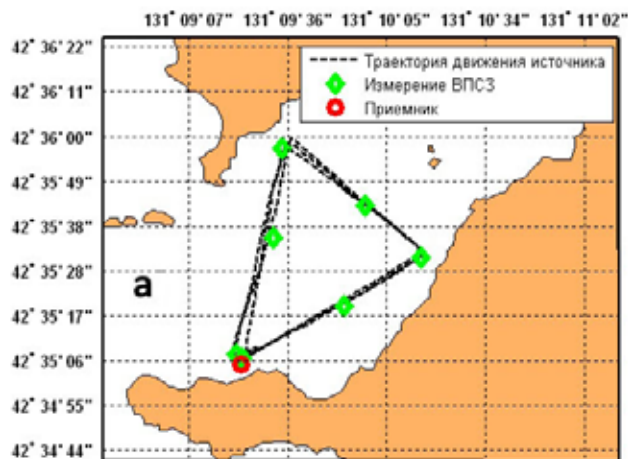


Рис. 4. Эксперимент: а – географическая схема; б – вертикальные профили скорости звука (ВПСЗ)

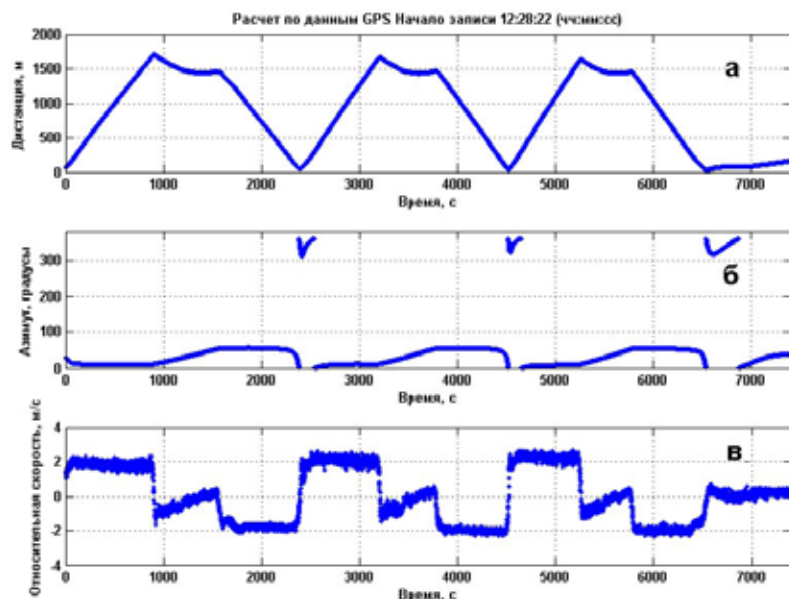


Рис. 5. Параметры относительного движения источник–приемник, рассчитанные с помощью данных GPS: а – дальность от приемника до источника; б – азимут между приемником и источником; в – скорость относительного движения приемник–источник V_{GPS} . Первая «петля» (от 0 до 2500 с) соответствует излучению пакета «А»; вторая – пакета «Б» (от 2500 до 4500 с); третья – пакета «В» (от 4500 до 7500 с)

которая измеряет координату движения источника каждую секунду, были рассчитаны: изменение дистанции от приемника до источника (рис. 5, а), азимут между приемником и излучателем (рис. 5, б); относительная скорость движения приемник–источник, V_{GPS} (рис. 5, в).

Для зондирования использовались три вида сигнальных пакетов: «А», «Б», «В». В данной работе будут представлены графические результаты обработки сигнальных пакетов «А» и «Б». Все пакеты имели единую временную структуру, которая состояла из блока сложных сигналов $s_{A,B}(t)$ (длительностью около 2 с), секундной паузы и тонального сигнала

$x_{TON}(t)$ на несущей частоте 2 кГц длительностью 2 с.

$$s_{ПАКЕТ\ A,B}(t) = [s_{A,B}(t), 0, x_{TON}(t)].$$

Пакеты «А» и «Б» излучались раз в 20 с. Сигнальные пакеты различались блоками сложных сигналов:

– блок сложных сигналов «А» состоял из 10 ЛЧМ-сигналов (центральная частота 2 кГц, полоса от 1.6 до 2.4 кГц, длительность одного ЛЧМ-сигнала 0,2 с):

$$s_A(t) = [x_{ЛЧМ}^1(t), x_{ЛЧМ}^2(t), \dots, x_{ЛЧМ}^{10}(t)];$$

– блок сложных сигналов «Б» состоял из 4 М-последовательностей на несущей $x_M(t)$ (длина последовательности 255 символов, $f_0 = 2$ кГц, на один символ последовательности приходится 4 периода несущей частоты, длительность одной М-последовательности на несущей 0,51 с):

$$s_B(t) = [x_M(t), x_M(t), x_M(t), x_M(t)];$$

– блок сложных сигналов «В» состоял из 2 ЛЧМ-сигналов, расположенных в начале и конце блока, в центре блока были расположены 4 М-последовательности на несущей $x_M(t)$:

$$s_B(t) = [x_{ЛЧМ}(t), x_M(t), x_M(t), x_M(t), x_M(t), x_{ЛЧМ}(t)].$$

■ Алгоритмы обработки и результаты

На приемной стороне сигнал с гидрофона оцифровывался на частоте дискретизации $F_s = 48$ кГц и записывался на ПК. Перед обработкой все сигнальные пакеты

ты фильтровались в полосе частот от 1,5 до 2,5 кГц.

Для того чтобы избежать несоответствия при сопоставлении оценок одной и той же физической величины (доплеровского смещения частоты f), полученных с помощью измерений GPS и по предложенным акустическим методикам, результаты оценок, соответствующие различным подходам, были обозначены как указано в табл. 1. Для преобразования относительной скорости движения v_{GPS} в доплеровское смещение несущей частоты использовались следующие значения: $f_0=2$ кГц, среднее значение скорости звука в волноводе в течение всего эксперимента равнялось $C=1513,87$ м/с.

Обработка тональных сигналов во всех пакетах заключалась в вычислении спектра принятого сигнала с помощью преобразования Фурье и поиска частоты, соответствующей максимуму спектра.

Обработка блоков сложных сигналов всех пакетов проводилась в соответствии с предложенной в данной работе методикой f_T . Последовательность действий:

1) производятся вычисления по формуле (10);

2) $T_r = TI[R_{rr}(\tau)]$ определяется временной интервал T_r ;

3) рассчитывается значение масштабирующего множителя Δ , используя (2);

4) рассчитывается значение смещенной эффектом Доплера несущей частоты сложного сигнала, используя (1).

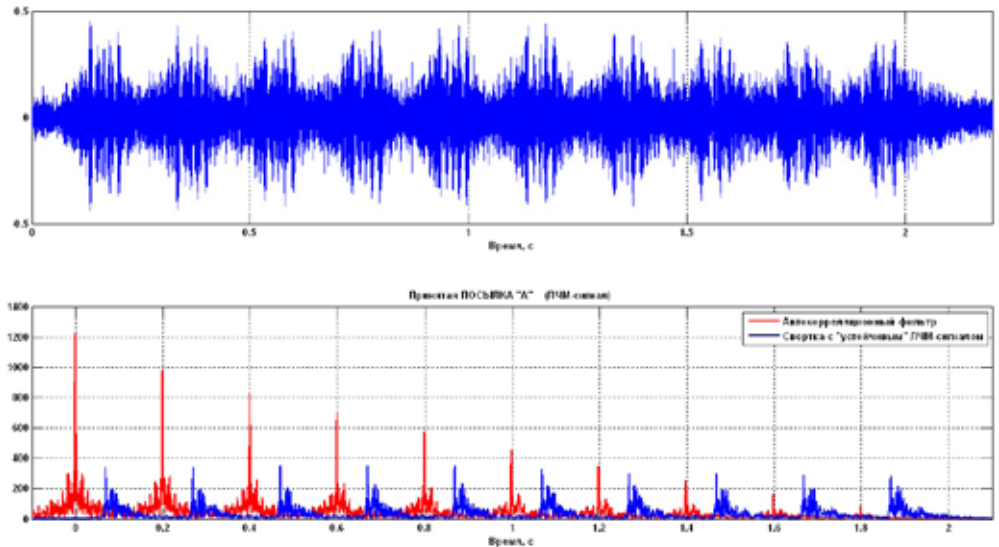


Рис. 6. Пример обработки: принятый сигнальный пакет «А» (верхняя панель): амплитудно-временная реализация принятого сигнала (нижняя панель) результаты взаимной корреляции принятого сигнального пакета с одиночным ЛЧМ-сигналом и автокорреляции принятого сигнального пакета

Обработка блока сложных сигналов, включающих в себя ЛЧМ-сигналы, пакетов «А» и «В» проводилась по методике $f_{ЛЧМ}$. Последовательность операций этой обработки аналогична последовательности f_T , за исключением того, что на этапе 1) производятся вычисления по формуле (7).

На рис. 6 представлен фрагмент зарегистрированной на приемнике части сигнального пакета «А», состоящей из 10 ЛЧМ-сигналов. На верхней панели изображена временная реализация сигнала, а на нижней кривая, изображенная синим цветом, – результат обработки с помощью алгоритма «Б», использующего «устойчивые» к эффекту Доплера ЛЧМ-сигналы, и кривая, изображенная красным цветом, – результат применения автокорреляционного алгоритма «В».

Графическое сопоставление оценок доплеровского смещения, полученных с помощью системы GPS f_{GPS} и с помощью алгоритмов обработки акусти-

Таблица 1. Условные обозначения результатов измерений доплеровского смещения, полученных различными методиками

Измеряемая физическая величина f	Обозначение оценок измеряемой величины, полученных с помощью различных подходов	Краткое описание методик
$f = (1 + \Delta)f_0$	$f_{GPS} = (1 + \Delta_{GPS})f_0 = \left(1 + \frac{v_{GPS}}{C}\right)f_0$	- измерение смещения несущей частоты с помощью значений v_{GPS} , полученных системой GPS
	$f_T = (1 + \Delta_T)f_0$	- измерение смещения несущей частоты с помощью оценок Δ_T , полученных по формуле (10), методика В
	$f_{Тон}$	- измерение смещения несущей частоты с помощью тонального сигнала
	$f_{ЛЧМ} = (1 + \Delta_{ЛЧМ})f_0$	- измерение смещения несущей частоты с помощью оценок $\Delta_{ЛЧМ}$, полученных по формуле (7), методика Б [7]

ческих данных $f_{\text{Тон}}, f_{\text{Т}}$ и $f_{\text{ЛЧМ}}$ приведено на рис. 7–9 (верхние изображения). Сравнения точности оценок между акустическими методами относительно измерений GPS $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{Тон}}|, |f_{\text{GPS}} - f_{\text{Т}}|$ и $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{ЛЧМ}}|$ приведено на нижних изображениях.

Как видно из графиков, оценки доплеровско-

го смещения частоты различными подходами дают близкие значения. Отсутствие отдельных значений оценок доплеровского смещения связано с довольно высокими уровнями шума, вызванными перемещением во время экспериментов нескольких туристических катеров в акватории.

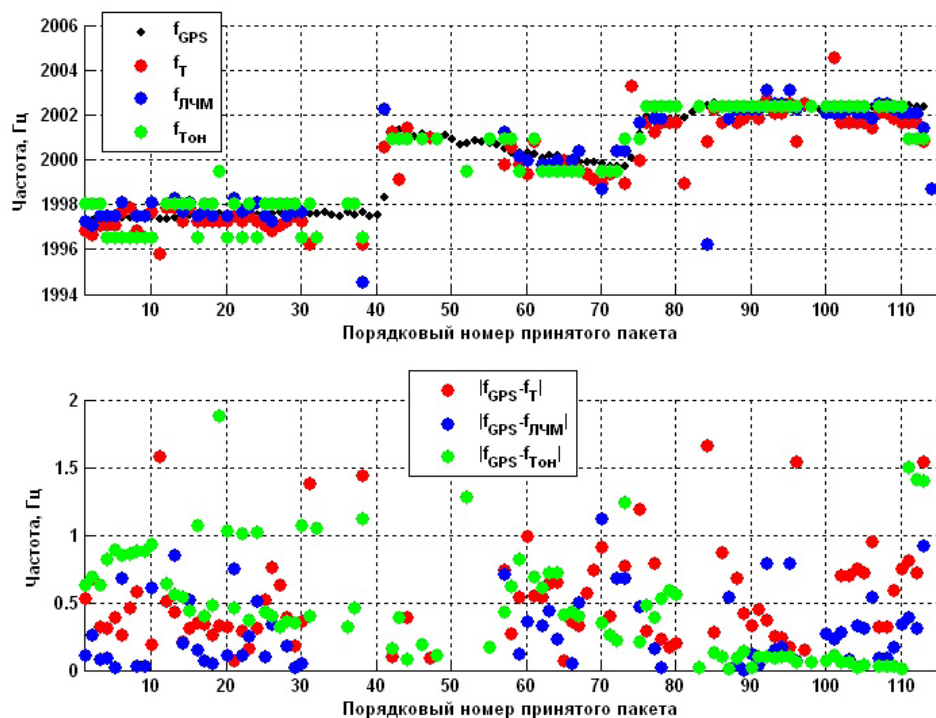


Рис. 7. Результаты обработки сигнального пакета «А»: (верхняя панель) акустические методики $f_{\text{Тон}}, f_{\text{Т}}, f_{\text{ЛЧМ}}$ и данные системы GPS f_{GPS} (смотрите таблицу); (нижняя панель) – модуль разности между f_{GPS} и $f_{\text{Тон}}, f_{\text{Т}}, f_{\text{ЛЧМ}}$, соответственно

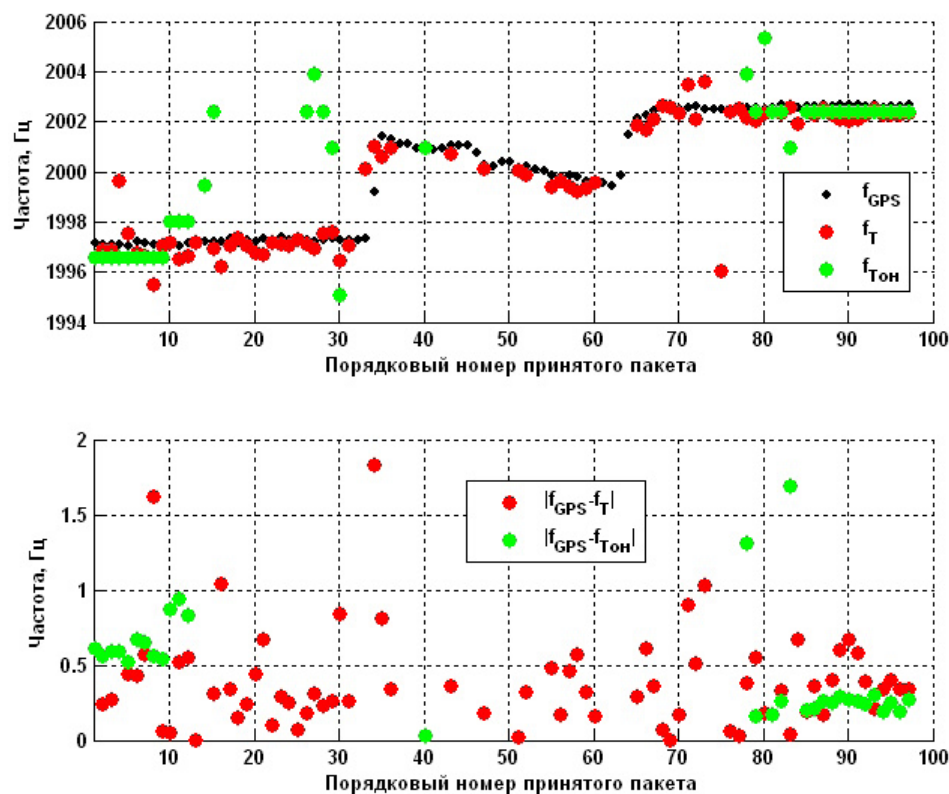


Рис. 8. Результаты обработки сигнального пакета «Б»: (верхняя панель) акустические методики $f_{\text{Тон}}, f_{\text{Т}}$ и данные системы GPS f_{GPS} (смотрите таблицу); (нижняя панель) – модуль разности между f_{GPS} и $f_{\text{Тон}}, f_{\text{Т}}$, соответственно

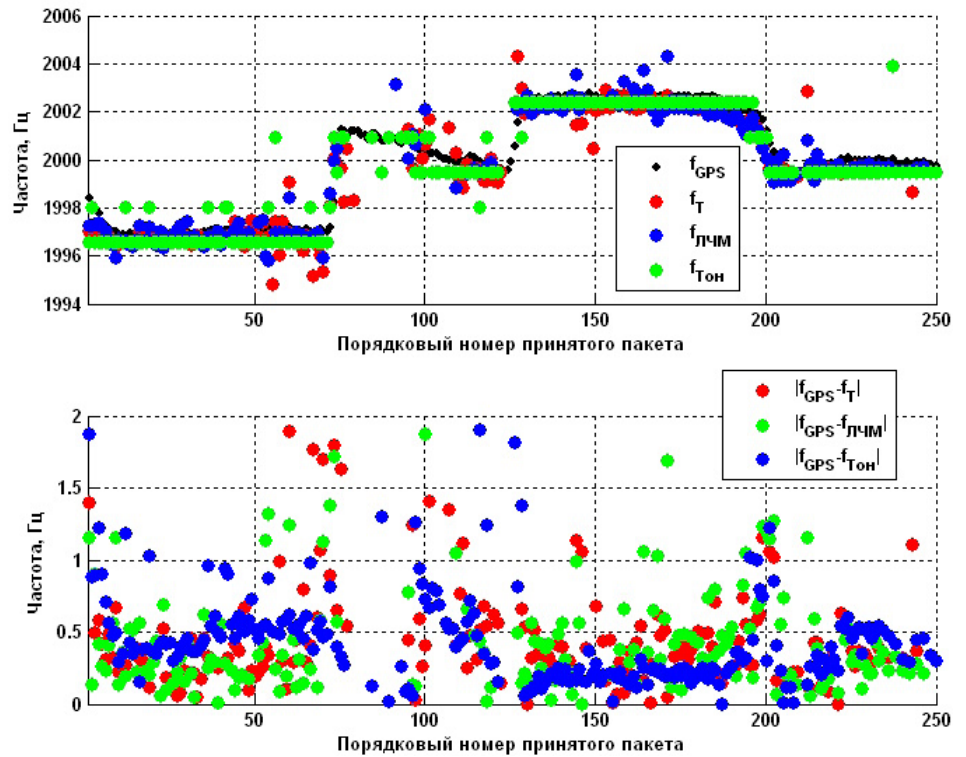


Рис. 9. Результаты обработки сигнала пакета «В»: (верхняя панель) акустические методики $f_{\text{ТОН}}$, f_{T} , $f_{\text{ЛЧМ}}$ и данные системы GPS f_{GPS} (смотрите таблицу); (нижняя панель) – модуль разности между f_{GPS} и $f_{\text{ТОН}}$, f_{T} , $f_{\text{ЛЧМ}}$ соответственно

Сравнение результатов, полученных разными методами обработки, показало, что точность оценок величины доплеровского смещения сопоставима друг с другом, отличие имеет порядок 10^{-1} . Результаты расчета по всем акустическим методикам f_{T} , $f_{\text{ЛЧМ}}$ и $f_{\text{ТОН}}$ относительно f_{GPS} приведены в табл. 2. В таблице в каждой клетке представлено среднее значение для всего массива принятых сигналов конкретного пакета и соответствующее среднеквадратическое отклонение $\langle |f_{\text{GPS}} - f| \rangle \pm \sigma(|f_{\text{GPS}} - f|)$. Самые неточные оценки получены с помощью методики $f_{\text{ТОН}}$. Оценки доплеровского смещения, полученные с помощью f_{T} и $f_{\text{ЛЧМ}}$, дали сопоставимые значения.

Таблица 2. Сопоставление результатов

	$f_{\text{T}}, \text{Гц}$	$f_{\text{ЛЧМ}}, \text{Гц}$	$f_{\text{ТОН}}, \text{Гц}$
$S_{\text{ПАКЕТ А}}(t)$	0.425 ± 0.288	0.348 ± 0.270	0.468 ± 0.373
$S_{\text{ПАКЕТ Б}}(t)$	0.360 ± 0.239	—	0.440 ± 0.289
$S_{\text{ПАКЕТ В}}(t)$	0.410 ± 0.304	0.416 ± 0.270	0.428 ± 0.273

Для проверки на корректность оценок, полученных с помощью представленной в данной работе методики, была осуществлена дополнительная обработка звуковых данных для пакета «В», которая заключалась в следующих этапах. На первом этапе был произведен пересчет частоты дискретизации F'_s в соответствии с полученными значениями Δ_f , используя (8), и с помощью линейной интерполяции

был преобразован принятый пакет $\bar{r}(t) = LI[r(t)]$. Эта операция нужна для устранения влияния эффекта Доплера на принятый пакет. На втором этапе была рассчитана «свертка»: $\bar{R}(\tau) = \bar{r}(t) \otimes x_M(t)$. Также была рассчитана «свертка» исходного (без компенсации эффекта Доплера) сигнала пакета $r(t)$ с $x_M(t)$: $R_M(\tau) = r(t) \otimes x_M(t)$. Результаты описанных выше вычислений приведены на рис. 10, в и 10, г. Из рис. 10, б видно, что оценки доплеровского сдвига Δ_f , полученные описанной в данной работе методикой, являются корректными, так как компенсация влияния эффекта Доплера в соответствии с Δ_f допускает использование свойств М-последовательности на несущей для измерения ИХК [12].

На рис. 10, в видно, что без компенсации эффекта Доплера принятый сигнал становится некоррелированным, что является вполне естественным для сигналов такого типа. Используя значение разрешающей способности по частоте М-последовательности на несущей $\Delta f_s = 1/T_s$ и соотношение $\Delta f_s = (v/C)f_0$, оценим, при каком значении относительной скорости принятый сигнал будет считаться некоррелированным с излученным. В нашем случае пороговое значение равно $v = (\Delta f_s / f_0)C = (1,9608/2000) \times 1513,87 = 1,4842$ м/с. (2,8875 узла). На рис. 10 детально представлен момент расхождения корреляции принятого сигнала с излученным. Жирными линиями выделен пороговый момент перехода к некоррелированности (рис. 10, в). На рис. 10, б представ-

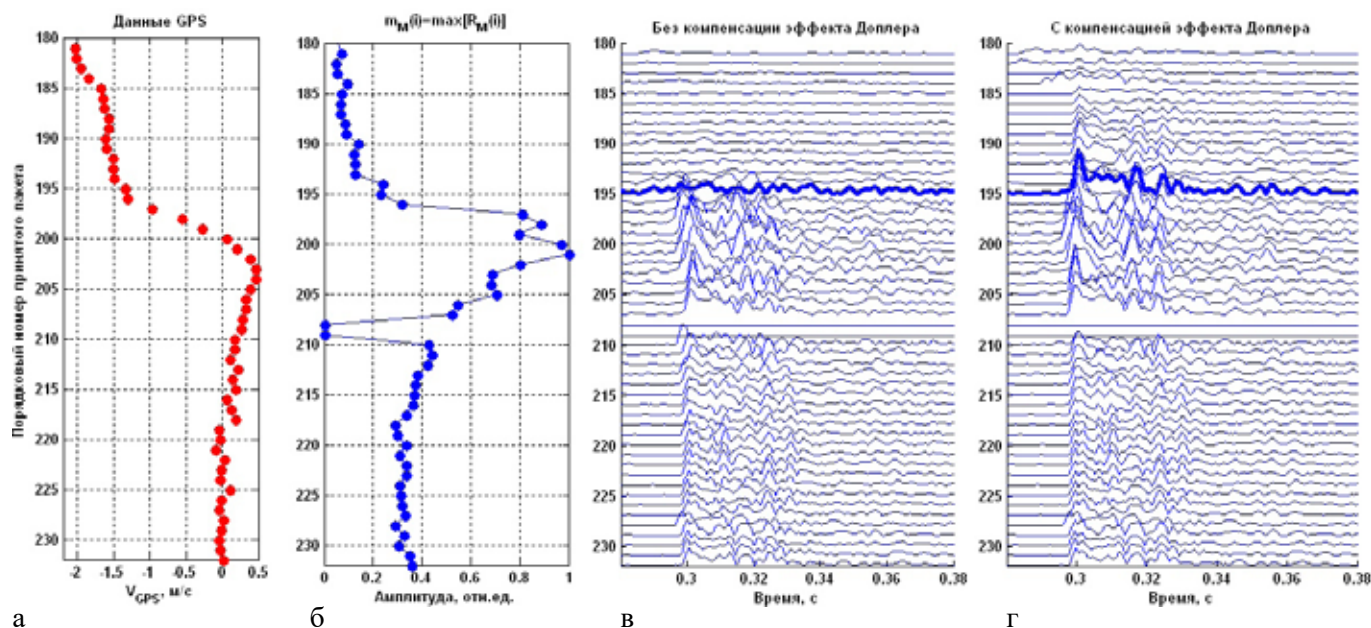


Рис. 10. Результаты экспериментальной проверки границы (порогового значения) коррелированности принятого и излученного сигнала (сигнальный пакет «Б»): а – изменение относительной скорости источник–приемник; б – изменение максимальных значений отдельных реализаций принятого сигнала; в – изменение импульсной характеристики канала без компенсации эффекта Доплера; г – изменение импульсной характеристики канала с компенсацией эффекта Доплера

лены значения максимумов отдельных реализаций $m_M(i) = \max[R_M(i)]$, здесь i – порядковый номер принятой посылки.

Выводы

Использование в излучаемом сигнальном пакете для оценки доплеровского смещения не менее двух произвольно расположенных в сигнальном пакете сложных сигналов, автокорреляционная функция каждого из которых имеет один максимум при нулевом сдвиге по временной оси, совместно с операцией «свертки» с самим собой позволяет:

- определить временной интервал, измененный эффектом Доплера (эффектом сжатия–растяжения);
- исключить предварительное согласование параметров сложных сигналов с ожидаемым максимальным доплеровским смещением несущей частоты сложного сигнала;
- получить выигрыш по амплитуде при обработке на приемной стороне, так как используются или «сравниваются» между собой два одинаковых измененных эффектом Доплера частотных спектра принятого сигнала, которые полностью совпадают друг с другом;
- снизить вычислительные затраты при обработке принятого сигнала по сравнению с методикой ВФН;
- не использовать в составном сигнальном пакете «устойчивые» к эффекту Доплера ЛЧМ-сигналы, а

оценивать доплеровское смещение с помощью сложных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами.

Предложенная методика позволяет использовать преимущества М-последовательности на несущей (высокое разрешение по времени, увеличение отношения сигнал/шум, низкий уровень боковых лепестков) в прикладных задачах гидроакустики (динамической акустической томографии океана, измерении характеристик течений, звукоподводной связи), в которых источник и/или приемник перемещаются в акватории.

Результаты проведенных экспериментальных исследований в условиях мелкого моря при наличии высокого уровня шумовых и импульсных помех показали возможность оценки доплеровского смещения частоты с помощью составного сигнального пакета, состоящего из сложных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами. Значение максимальной относительной скорости движения составляло 2,2 м/с (4,28 узла). Сопоставление с другими акустическими подходами подтвердило корректность и работоспособность предложенной в работе методики.

Гранты и Программы

Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения

эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: ААА-А-20-120031890011-8); «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: 0211-2021-

0002). Анализ и интерпретация результатов проводились в рамках НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования», № гос. регистрации 123072000039-5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.
3. Stojanovic M., Catipovic J., Proakis J. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels // IEEE J. Ocean. Eng. 1994. Vol. 19, No. 1. P. 100–111.
4. Захаров Ю.В., Коданев В.П. Адаптивный прием сигналов в гидроакустическом канале связи с учетом доплеровского рассеяния // Акуст. журн. 1995. Т. 41, № 2. С. 254–259.
5. Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 2. С. 245–255.
6. Johnson M., Freitag L., Stojanovic M. Improved Doppler tracking and correction for underwater acoustic communications // Proc. ICASSP. 1997. P. 575–578.
7. Sharif B., Neashan J., Hinton O., Adams A. A computationally efficient doppler compensation system for underwater acoustic communication // IEEE J. Ocean. Eng. 2000. Vol. 25, No. 1. P. 52–61.
8. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследований в области акустической навигации // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 6. С. 804–808.
9. Munk W.H., Worcester P.F., Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography: Monograph. New York: Cambridge University Press, 1995. 433 p.
10. Rihaczek A.W. Principles of High-Resolution Radar. Peninsula Publishing, 1985. 505 p.
11. Duda T.F. Analysis of finite-duration wide-band frequency sweep signals for ocean tomography // IEEE J. Ocean. Eng. 1993. Vol. 18, No. 2. P. 87–94.
12. Duda T., Morozov A., Howe B., Brown M., Speer K., Lazarevich P., Worcester P., Cornuelle B. Evaluation of a Long-Range Joint Acoustic Navigation / Thermometry System // OCEANS. IEEE: Boston, MA, USA, 2006. P. 1–6.
13. Кеббал К.Г., Кеббал А.Г., Яковлев С.Г. Способ цифровой связи по многолучевым гидроакустическим каналам с применением частотно-модулированного несущего сигнала // Акуст. журн. 2004. Т. 50, № 2. С. 220–230.

Об авторах

БУРЕНИН Александр Викторович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории акустической томографии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика, гидрофизика, цифровая обработка сигналов, численное моделирование
Тел.: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: alex_bu@poi.dvo.ru, shurick_burenin1@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0062-4510

ДИДЕНКО Вадим Викторович, студент-магистрант, инженер лаборатории акустической томографии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана, цифровая обработка сигналов, акустическая навигация, акустическая локация, подводно-акустическая связь, акустическая томография
Тел.: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: didenko.vv@students.dvfu.ru



ESTIMATION OF THE DOPPLER SHIFT BY COMPLEX SIGNALS IN A HYDROACOUSTIC WAVEGUIDE

A.V. Burenin, V.V. Didenko

This paper presents a technique for estimating the Doppler frequency shift of the probing signal. The technique is based on the use of a signal packet consisting of at least two identical complex signals with "good" autocorrelation properties, and the operation of autocorrelation ("convolution" of the received signal with itself) at the receiver. The results of experimental testing of the technique, carried out on August 17, 2013, are presented. The obtained field data are compared with GPS measurements and algorithms for estimating the Doppler shift.

Keywords: Doppler effect, Doppler shift estimation, complex signals, M-sequence on a carrier, chirp signals, autocorrelation.

References

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.
3. Stojanovic M., Catipovic J., Proakis J. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels. IEEE J. Ocean. Eng. 1994. Vol. 19, No. 1. P. 100-111.
4. Zakharov Yu.V., Kodanov V.P. Doppler scattering adapted reception in a hydroacoustic communication channel. Akusticheskij Zhurnal. 1995. Vol. 41, No. 2. P. 254-259.
5. Kuryanov B.F., Penkin M.M. Digital acoustic communication in shallow-water sea for oceanological applications. Acoustical Physics. 2010. Vol. 56, No. 2. P. 218-227.
6. Johnson M., Freitag L., Stojanovic M. Improved Doppler tracking and correction for underwater acoustic communications. Proc. ICASSP. 1997. P. 575-578.
7. Sharif B., Neashan J., Hinton O., Adams A. A computationally efficient doppler compensation system for underwater acoustic communication. IEEE J. Ocean. Eng. 2000. Vol. 25, No. 1. P. 52-61.
8. Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Morgunov Yu.N., Tagil'tsev A.A. Processing of acoustic signals and computer modeling instrumental and programming measuring complex for acoustic navigation investigations. Acoustical Physics. 2011. Vol. 57, No. 6. P. 819-823.
9. Munk W.H., Worcester P.F., Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography: Monograph. New York: Cambridge University Press, 1995. 433 p.
10. Rihaczek A.W. Principles of High-Resolution Radar: Peninsula Publishing, 1985. 505 p.
11. Duda T.F. Analysis of finite-duration wide-band frequency sweep signals for ocean tomography. IEEE J. Ocean. Eng. 1993. Vol. 18, No. 2. P. 87-94.
12. Duda T., Morozov A., Howe B., Brown M., Speer K., Lazarevich P., Worcester P., Cornuelle B. Evaluation of a Long-Range Joint Acoustic Navigation. Thermometry System. OCEANS. 2006. P. 1-6.
13. Kebkal K.G., Kebkal A.G., Yakovlev S.G. A Frequency-modulated-carrier digital communication technique for multipath underwater acoustic channels. Acoustical Physics. 2004. Vol. 50, No. 2. P. 177-184.

About the authors

BURENIN Alexandr Victorovich, PhD, Senior research scientist V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
ORCID: 0000-0003-0062-4510
Research interests: ocean acoustics, acoustic navigation, acoustic ranging, underwater acoustic communication, acoustic tomography
Phone: +7 (423) 231-1631, **fax:** +7 (423) 231-2573
E-mail: alex_bu@poi.dvo.ru, shurick_burenin1@mail.ru

DIDENKO Vadim Viktorovich, master's student, engineer of the acoustic tomography laboratory V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: ocean acoustics, acoustic navigation, acoustic ranging, underwater acoustic communication, acoustic tomography, numerical modeling
Phone: +7 (423) 231-1631, **fax:** +7 (423) 231-2573
E-mail: didenko.vv@students.dvfu.ru

