



А. Ф. Курчанов

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ), <http://www.vniiftri.ru/>, e-mail: [director@vniiftri.ru](mailto:director@vniiftri.ru)*

## Пеленг малозумного объекта комбинированным приемником

*Получена 17.01.2006, опубликована 24.01.2006*

Рассматривается задача определения направления на малозумный объект и определения его уровня подводного шума при наличии шума поверхности моря. Результат получают, основываясь на усредненных во времени полиномах второй степени относительно акустического давления и/или компонент колебательной скорости. Точность пеленга вырастает более чем в 3 раза по сравнению с пеленгом по потоку мощности. Помехоустойчивость увеличивается на 4–5 дБ. Снижаются требования к точности изготовления приемника. Алгоритм дает наибольший выигрыш в частотном диапазоне выше 2 кГц.

### ВВЕДЕНИЕ

Пусть на фоне шума поверхности моря имеется слабый (например, на 10 дБ меньше в точке приема) сигнал сосредоточенного малозумного объекта. Комбинированный векторный приемник измеряет в полосе частот анализа акустическое давление  $P$  и колебательную скорость  $\vec{V}$ . Обработывая измеренные величины, мы хотим обнаружить наличие объекта и найти его пеленг. Это можно сделать, используя вектор потока мощности. Однако ниже обсуждается более эффективный подход к решению такой задачи.

### ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Введем обозначения. Плотность среды  $\rho$ , скорость звука  $c$ , компоненты колебательной скорости в декартовой системе координат  $V_1, V_2, V_3$ , оси 1 и 2 направлены горизонтально, ось 3 направлена вертикально вверх. Направления осей 1 и 2 считаются известными, например, определяются с использованием компаса или компаса совместно с инклинометром. Обозначим  $V_0 = P/(\rho c)$ . В полосе частот шириной  $F$  [Гц], полагая шум поверхности и шум объекта близкими к белому, независимые измерения сигналов проводим с периодом  $\tau = 1/(2F)$  [с] в моменты

времени  $t_i$ ,  $i = (1, 2, \dots, N)$ . Угловыми скобками обозначим усреднение во времени, например:

$$\langle V_i V_j \rangle = \left( \sum_{k=1}^N V_i(t_k) V_j(t_k) \right) / N.$$

Для величин  $\langle V_0^2 \rangle$ ,  $\langle V_0 V_i \rangle$  подразумевается то же.

Диаграмма направленности излучающего шум участка поверхности [1, стр.659]  $g^2(\Omega) = I_0 \cos^{2m}(\Omega)$ , где  $I_0$  — интенсивность излучения при  $\Omega = 0$ , а  $\Omega$  — угол отклонения от вертикального направления. Интенсивность принимаемого сигнала от участка поверхности пропорциональна его площади и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Число  $m$  лежит [1, стр.663] в пределах от 0.5 до 1 для частотного диапазона до 300–400 Гц и  $m = 1, 2, 3$  для диапазона частот выше 500 Гц, с увеличением скорости ветра и с увеличением частоты число  $m$  увеличивается. Согласно же результатам работы [2], число  $m$  может быть равным 0.5 даже до частоты 700 Гц. Обозначим

$$\langle V_3^2 \rangle = T_3.$$

Тогда, после несложных вычислений, получим:

$$\langle V_0 V_3 \rangle = -T_3 \frac{2m+2}{2m+1},$$

$$\langle V_0^2 \rangle = T_3 \frac{m+1}{m} \equiv E_3,$$

$$\langle V_1^2 \rangle = \langle V_2^2 \rangle = \frac{1}{2m} T_3.$$

Следовательно, для целей моделирования сигналов мы можем использовать четыре независимых случайных процесса с нулевым средним и единичной дисперсией  $\varepsilon_0(t_k)$  и  $\varepsilon_i(t_k)$ ,  $i = (1, 2, 3)$ . Тогда шум поверхности можно смоделировать как

$$V_3 = \varepsilon_3 \sqrt{\frac{m}{m+1}} E_3, \quad (1)$$

$$V_0 = -\varepsilon_3 \sqrt{\frac{2m}{2m+1}} E_3 + \varepsilon_0 \sqrt{\frac{1}{2m+1}} E_3, \quad (2)$$

$$V_1 = \varepsilon_1 \sqrt{\frac{1}{2(m+1)}} E_3, \quad (3)$$

$$V_2 = \varepsilon_2 \sqrt{\frac{1}{2(m+1)}} E_3. \quad (4)$$

Введем обозначения:

$$V'_0 = V_0 + V_3 q, \text{ где } q = \sqrt{\frac{2(m+1)}{2m+1}}, \quad (5)$$

$$W_1 = \langle V_0 V_1 \rangle \rho c,$$

$$W_2 = \langle V_0 V_2 \rangle \rho c,$$

$$W'_1 = \langle V'_0 V_1 \rangle \rho c,$$

$$W'_2 = \langle V'_0 V_2 \rangle \rho c.$$

Для объекта, излучающего шум в горизонтальном направлении, вектор потока мощности с компонентами  $W_1$ ,  $W_2$  и вектор с компонентами  $W'_1$ ,  $W'_2$  при большом времени усреднения совпадут. Однако при конечном времени усреднения флуктуация вектора  $W'$  будет существенно меньше, т. е. эффективное отношение сигнал/помеха станет лучше (примерно на 3 дБ при  $m = 1.5$ ). Сигнал малошумного объекта выразим формулами:

$$V_3 = 0,$$

$$V_0 = \varepsilon_4 \sqrt{E_4},$$

$$V_1 = -\varepsilon_4 \sqrt{E_4} \cos(\varphi),$$

$$V_2 = -\varepsilon_4 \sqrt{E_4} \sin(\varphi),$$

где  $\varphi$  – угол пеленга объекта в горизонтальной плоскости,  $\varepsilon_4(t_k)$  случайный процесс с нулевым средним и единичной дисперсией, а величина  $E_4$  характеризует интенсивность излучения шума объектом. Обозначим:

$$U_1 = \langle V_1^2 \rangle - \langle V_2^2 \rangle,$$

$$U_2 = 2 \langle V_1 V_2 \rangle.$$

Тогда, при большом времени усреднения, получим

$$U_1 = E_4 \cos(2\varphi),$$

$$U_2 = E_4 \sin(2\varphi).$$

Из этих уравнений по полученным в результате измерений величинам  $U_1$  и  $U_2$  мы можем вычислить величины  $E_4$  и  $\varphi$  (с точностью до слагаемого, кратного  $\pi$ ) и можем построить вектор  $U'$  с компонентами

$$U'_1 = E_4 \cos(\varphi) \rho c,$$

$$U'_2 = E_4 \sin(\varphi) \rho c.$$

Направление вектора  $U'$  определено с точностью до смены знака. Смысл вектора такой же, как и вектора потока мощности  $W$  или вектора  $W'$  с уменьшенной флуктуацией.

Шум поверхности моря искажает измеренные значения векторов  $W'$  и  $U'$ , но согласно формулам (1-4) шумовая составляющая, вносимая в вектора  $W'$  и  $U'$  практически независима друг от друга. В вектор  $W'$  дают вклад произведения  $\langle \varepsilon_0 \varepsilon_1 \rangle$  и  $\langle \varepsilon_0 \varepsilon_2 \rangle$ , а в вектор  $U'$  дают вклад произведения  $\langle \varepsilon_1 \varepsilon_2 \rangle$ ,  $\langle \varepsilon_1^2 \rangle$  и  $\langle \varepsilon_2^2 \rangle$ , а потому взвешенная сумма этих векторов будет зашумлена меньше, и эффективное отношение сигнал/помеха возрастет. Другими словами, мы вычисляем два вектора:

$$M_1 = (\alpha W'_1 + \beta U'_1) / (\alpha + \beta),$$

$$M_2 = (\alpha W'_2 + \beta U'_2) / (\alpha + \beta),$$

$$M'_1 = (\alpha W'_1 - \beta U'_1) / (\alpha + \beta),$$

$$M'_2 = (\alpha W'_2 - \beta U'_2) / (\alpha + \beta).$$

$M$  – с компонентами  $M_1$  и  $M_2$  и  $M'$  – с компонентами  $M'_1$  и  $M'_2$ , и в качестве ответа выбираем тот из них, чей модуль больше. Таким образом, вектор потока мощности позволяет нам правильно выбрать знак вектора  $U'$ , а вектор  $U'$  вместе с вектором  $W'$  позволяют нам снизить флуктуацию результата.

#### ДОСТИГАЕМЫЕ ЦЕЛИ

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  могут быть выбраны в зависимости от желаемой цели. Таких существенно разных целей видится две, а именно: точно найти направление на объект и точно определить уровень его подводного шума. Мы далее будем пытаться наиболее точно определить направление на малозумный объект. Пусть объект находится по направлению координаты 1 (север). Тогда в компоненту  $U_2$  шум поверхности моря даст вклад, пропорциональный величине  $\frac{E_3}{m+1} \langle \varepsilon_1 \varepsilon_2 \rangle$ , а в компоненту  $U'_2$ ,

соответственно, в 2 раза меньше, т. е.  $k = \frac{E_3}{2(m+1)} \langle \varepsilon_1 \varepsilon_2 \rangle$  т. к. мы в 2 раза уменьшаем

угол. В компоненту же  $W'_2$  вклад будет равным

$$\frac{E_3}{\sqrt{2(m+1)(2m+1)}} \langle \varepsilon_0 \varepsilon_2 \rangle = k \sqrt{\frac{m+1}{m+0.5}} > k. \text{ Таким образом, направление вектора } U'$$

искажено шумом поверхности несколько меньше, чем у вектора  $W'$  и уже существенно меньше, чем у вектора  $W$  потока мощности. Весовые коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  представляется разумным выбрать в виде

$$\alpha = m + 0.5,$$

$$\beta = m + 1.$$

В этом случае дисперсия пеленга будет минимальной.

В обсуждаемом алгоритме имеется всего одна «нелинейная» операция, переводящая вектор  $U$ , направленный под «двойным» углом в вектор  $U'$ , направленный на источник шума.

Если же мы хотим определить по возможности точно не направление на источник шума, а уровень шума источника, тогда коэффициент  $\alpha$  следует увеличить в 2 раза, не меняя коэффициента  $\beta$ . В результате мы получаем как оценку пеленга источника, так и оценку уровня его подводного шума. Чем дальше источник шума находится от приемника, тем слабее принимаемый приемником сигнал, но тем меньше угловая скорость источника относительно приемника и, соответственно, тем больше допустимое время одиночного пеленга. Таким образом, увеличение дистанции до объекта в 2 раза ухудшает эффективное отношение сигнал/помеха не на 6 дБ, а только на 3 дБ. И обратно, улучшение помехоустойчивости на 3 дБ эквивалентно увеличению дистанции пеленга в 2 раза, а площади пеленгуемой поверхности в 4 раза.

В случае если объект находится близко и кроме азимута требуется определить его угол места, можно, следуя вышеизложенному подходу, написать соответствующие формулы. Однако, ввиду громоздкости таких формул, в данной работе они не приводятся.

## ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НА МОДЕЛИ

Ниже, исключительно с целью сокращения изложения, будем рассматривать случай, когда шум одного сосредоточенного источника приходит на приемник в горизонтальном направлении. Такой случай реализуется, например, если приемник находится не слишком глубоко под поверхностью, а где-то вдалеке движется судно. Приемник принимает в полосе частот анализа суммарный сигнал шума поверхности и шума от сосредоточенного объекта. Мы проиллюстрируем работу алгоритма на простом примере.

Параметр  $m$  примем равным 1,5. Для отношения сигнал/помеха (по акустическому давлению в точке приема) от 0 до -25 дБ моделированием 100 групп по 1000, 10000 и 40000 измерений сигнала построим графики для пеленга объекта с помощью вектора потока мощности и с помощью обсуждавшегося выше алгоритма. На графиках (рис. 1–3) изобразим отношение среднего квадратического отклонения измеренного угла направления на источник в градусах. Усреднение 1000 измерений сигнала соответствует пеленгу, взятому в течение 1 секунды в полосе частот 500 Гц (1/6-октавы на частоте 4 кГц). Пеленг 40 секунд можно, видимо, считать максимально допустимым по длительности, при этом объект на скорости 40 км/ч и дистанции 2 км изменяет пеленг на 13°.

Пеленг 1 секунда в полосе 500 Гц

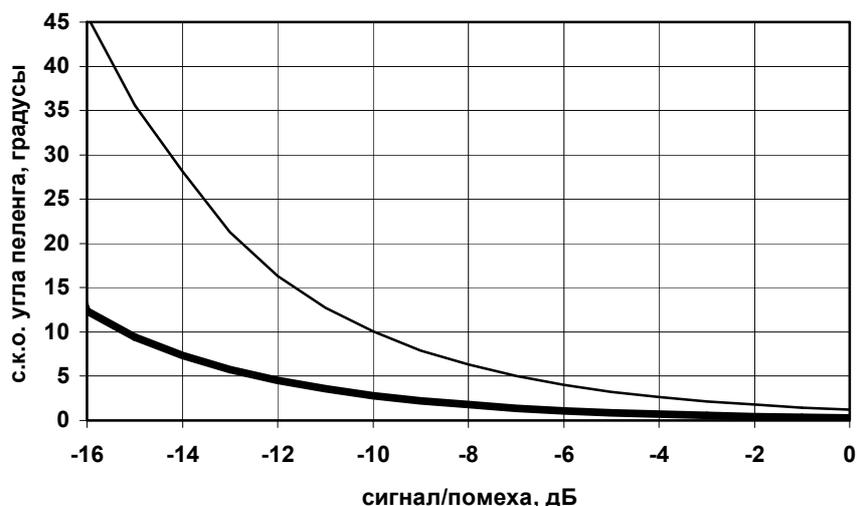


Рис. 1. Сравнение точности пеленга обсуждаемым алгоритмом и пеленгом по потоку мощности. Тонкой линией изображено среднее квадратическое отклонение угла пеленга, определенного по потоку мощности, жирной линией — согласно вышеизложенному алгоритму

Пеленг 10 секунд в полосе 500 Гц

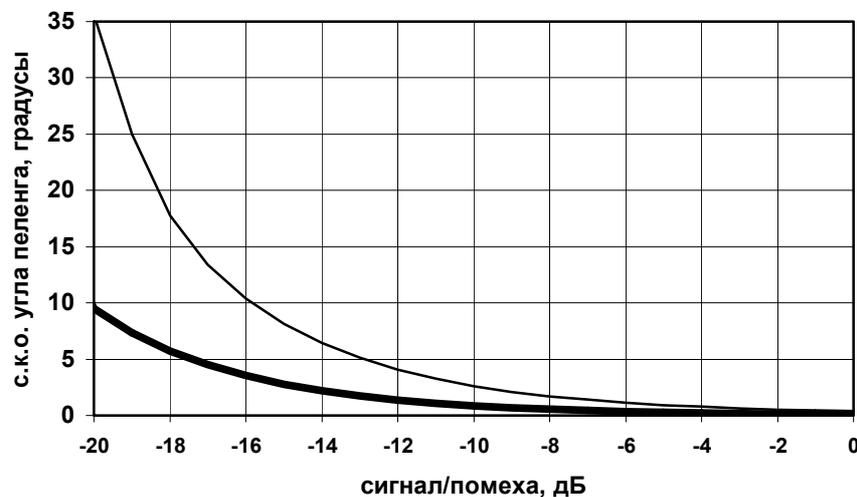


Рис. 2. Сравнение точности пеленга обсуждаемым алгоритмом и пеленгом по потоку мощности. Тонкой линией изображено среднее квадратическое отклонение угла пеленга, определенного по потоку мощности, жирной линией — согласно вышеизложенному алгоритму

Пеленг 40 мекунд в полосе 500 Гц

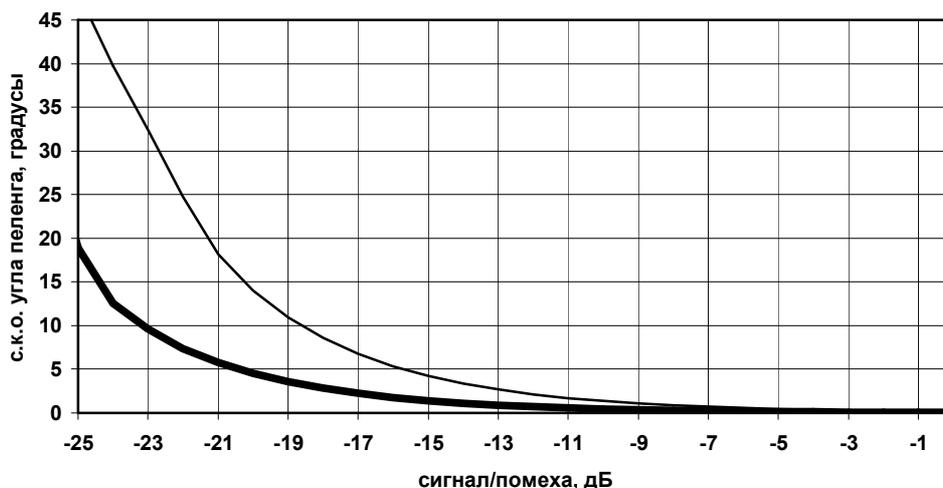


Рис. 3. Сравнение точности пеленга обсуждаемым алгоритмом и пеленгом по потоку мощности. Тонкой линией изображено среднее квадратическое отклонение угла пеленга, определенного по потоку мощности, жирной линией — согласно вышеизложенному алгоритму

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рисунка 4 мы видим, что погрешность определения пеленга по вышеизложенным формулам составляет только 30–33% от погрешности определения пеленга по горизонтальному потоку мощности. Из рисунков же 1–3 видно, что выигрыш по эквивалентному отношению сигнал/помеха составляет всего 4–5 дБ. Однако этот выигрыш позволяет пеленговать более удаленные объекты, а стало быть, движущиеся с меньшей угловой скоростью. За счет этого можно увеличить время пеленга и повысить его точность. Увеличение времени пеленга в 4 раза улучшает помехоустойчивость на 3 дБ.

Из рисунка 5 мы видим, что при браковке части пеленгов оставшиеся незабракованными пеленги позволяют увеличить помехоустойчивость еще на 3 дБ и работать при отношении сигнал/помеха, достигающем минус 26–28 дБ.

Важно обсудить границы применимости предложенного алгоритма. Если оси 1, 2 приемника не будут лежать точно в горизонтальной плоскости, то работа алгоритма нарушится. Предположим, например, что плоскость осей 1 и 2 отклонена от горизонтали на угол  $\gamma = 2^\circ$ , время пеленга 40 секунд, а полоса анализа 500 Гц.

При пеленге объекта по горизонтальной составляющей вектора потока мощности вертикальный поток мощности даст в плоскости осей 1 и 2 вклад, равный полезному сигналу при отношении сигнал/помеха  $-16$  дБ ( $\gamma = 2^\circ$ ). В этом случае пеленг вообще невозможен.

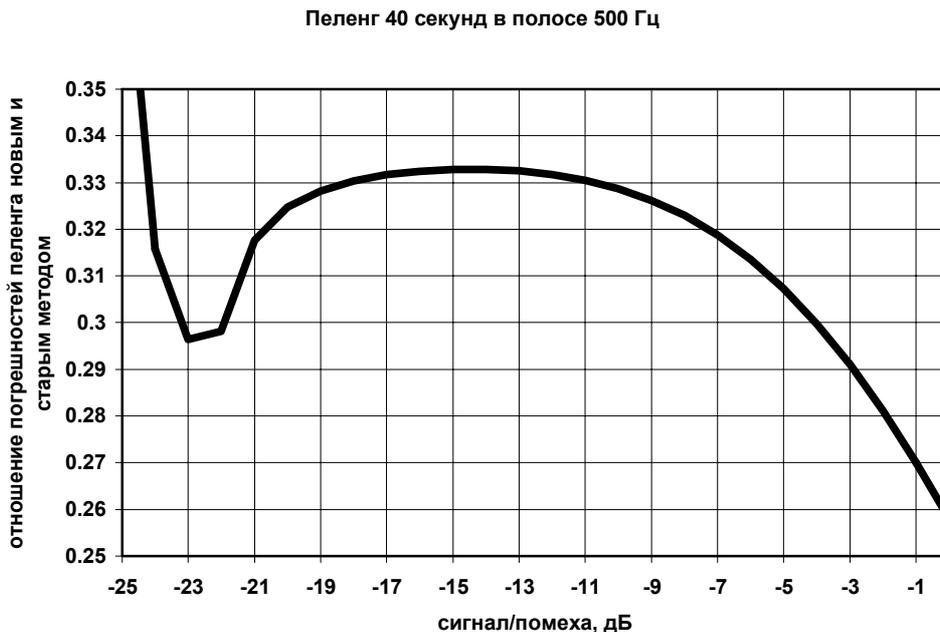


Рис. 4. Отношение погрешности угла пеленга, полученного обсуждаемым алгоритмом к погрешности угла, полученного из потока мощности

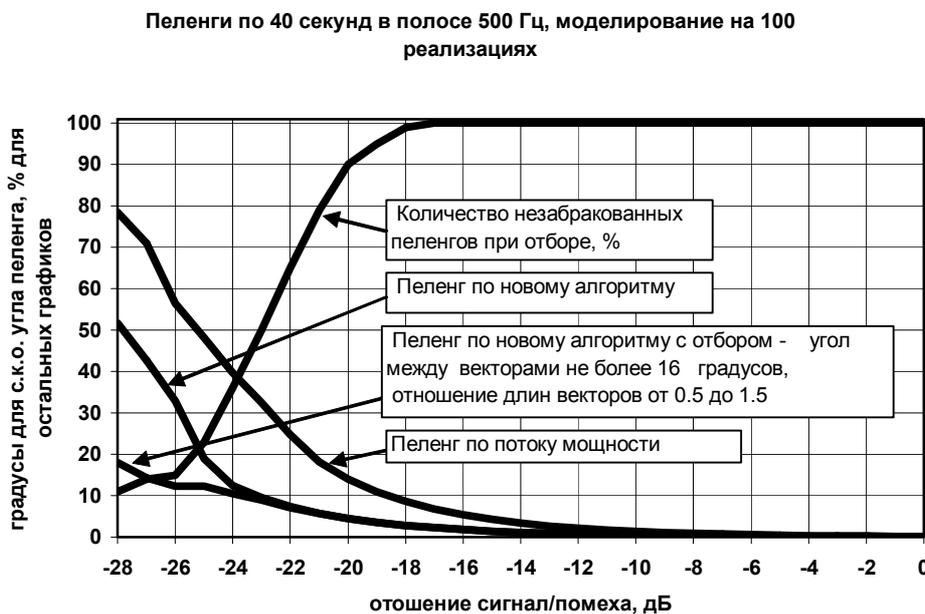


Рис. 5. Работа алгоритма при самобраковке части пеленгов. Пеленг принимается верным, если угол между векторами  $W'$  и  $U'$  не превышает  $16^\circ$ , и отношение модуля вектора  $U'$  к модулю вектора  $W'$  лежит в пределах от 0,5 до 1,5. Оптимизация критерия отбора не проводилась

Для изложенного же выше алгоритма погрешности существенно снижаются. Для вектора  $U'$  погрешность не имеет составляющей, пропорциональной первой степени угла  $\gamma$  и при малых  $\gamma$  пропорциональна  $\gamma^2$ . Однако для вектора  $W'$  составляющая, пропорциональная первой степени угла  $\gamma$  присутствует, хотя и невелика. Но если в формуле (5) заменить выражение для  $q$  на  $q = \frac{2m}{2m-1} \sqrt{\frac{2(m+1)}{2m+1}}$  то тогда такая составляющая исчезнет. Моделирование показывает, что в этом случае перекося осей на  $2^\circ$  приводит к смещению пеленга не более чем на  $2.5^\circ$  при отношении сигнал/помеха равном  $-25$  дБ. Однако это верно при  $m = 1.5$ , т. е. для частот 3–4 кГц и выше. Для частот ниже 300 Гц параметр  $m$  примерно равен 0.5, и такая замена выражения для  $q$  невозможна. Оптимальный выбор параметра  $q$  зависит от соотношения случайной и систематической погрешности, т. е. от ширины полосы анализа, времени пеленга, точности изготовления приемника и его подвески, частотного диапазона и свойств акватории.

При моделировании перекося осей на  $2^\circ$  для систематической погрешности пеленга  $16^\circ$  предел помехоустойчивости по отношению сигнал/помеха для пеленга по потоку мощности составил  $-11$  дБ, а по изложенному алгоритму (выражение для  $q$  по формуле 5)  $-19$  дБ. При моделировании перекося осей на  $1^\circ$  результаты получились соответственно  $-14$  дБ и  $-21$  дБ. При моделировании перекося осей на  $0.25^\circ$  результаты получились соответственно  $-20$  дБ и  $-28$  дБ. При моделировании перекося осей на  $0.1^\circ$  для отношения сигнал/помеха  $-28$  дБ и при использовании отбора пеленгов влияние перекося на работу алгоритма становится пренебрежимо малым. Перекося осей вызывается как неточностью изготовления приемника, так и колебаниями вертикального кабеля. Угол  $0.1^\circ$  соответствует отклонению 1.7 мм на метре длины и приблизительно соответствует тем точностям, которые используют при работе плотники и каменщики. Если подвеска приемника заключена в обтекатель и правильно сконструирована, то точность установки вертикали  $0.1^\circ$  нельзя считать слишком обременительной.

С другой стороны, неидентичность каналов приемника по осям 1 и 2 также должна быть малой, что можно обеспечить настройкой электроники при калибровке приемника на стенде. В-третьих, если приемник несовершенен и плохо откалиброван, но установлен в обследуемый район заранее, когда наверняка известно, что в районе нет никаких шумящих объектов — приемник может самонастроиться, определить вертикаль (среднее направление шумов поверхности и отраженного дном сигнала), выбрать горизонтальную плоскость и выровнять коэффициенты преобразования по горизонтальным осям. В этом случае при попадании в район малозумного объекта пеленг возможен даже простым не откалиброванным точно приемником. Алгоритм обработки сигналов настолько прост, что может быть полностью выполнен микропроцессором, расположенным рядом с приемником и при использовании в

радиобуе будет передан пеленг, уровень шума, а при более сильном сигнале, кроме того, спектр шумов пеленгуемого объекта. При этом приемник должен работать совместно с качественным компасом или, что много лучше, с лазерным гироскопом. В северных широтах направление магнитной силовой линии мало отклоняется от вертикального направления и один только компас, без инклинометра, не может достаточно точно определить направление на север. Разумеется, если при установке некалиброванного приемника в точку измерений в районе уже имеется один малозумный объект с изменяющимся пеленгом, то тогда, при самонастройке приемника объект вначале окажется «невидим», а потом появится, но с неверным пеленгом, а после ухода объекта из района все неверные пеленги могут быть исправлены. Если же приемник качественно откалиброван заранее, то верные пеленги появятся без задержки.

Выше рассмотрен пеленг объекта на основе обработки принятого комбинированным векторным приемником сигнала. Однако, если совместно с таким приемником работает антенна, выполненная в виде вертикальной цепочки гидрофонов, то возможности по повышению помехоустойчивости и точности пеленга возрастают многократно.

## ВЫВОДЫ

Предложенный алгоритм пеленга имеет выигрыш по сравнению с пеленгом удаленного в горизонтальной плоскости малозумного объекта по его потоку мощности. Выигрыш по помехоустойчивости при равной случайной погрешности составляет около 5 дБ, а при использовании сортировки пеленгов может достигать 7 дБ. При равном отношении сигнал/помеха случайная погрешность угла пеленга снижается более чем в 3 раза. Влияние неточности расположения осей приемника относительно вертикали на полученный угол пеленга в горизонтальной плоскости сказывается при отношении сигнал/помеха на 8 дБ меньшем.

Алгоритм дает наибольший выигрыш в частотном диапазоне выше 2 кГц. Для более низких частот выигрыш несколько снижается и возникает необходимость использования алгоритмов [3], учитывающих возможность наличия, кроме шума поверхности, сосредоточенного источника помехи (например, идущего вдалеке судна).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акустика океана. Под редакцией Л.М.Бреховских, М., «Наука», 1974, 693 с.
2. Щуров В. А. Векторная акустика океана. Владивосток, Дальнаука, 2003, 307 с.
3. Курчанов А. Ф., Маслов В. К. Аналитическое решение задачи измерения мощности шумящего источника комбинированным приемником на фоне сосредоточенной и изотропной помех. Электронный журнал «Техническая акустика», 2005, 27, 7 с.