

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 681.88

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ПРОЦЕССОВ  
НА ВЫХОДЕ КАНАЛОВ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА  
И КОМБИНИРОВАННОЙ АНТЕННЫ

© 2018 г. А. А. Горелов\*, М. Д. Смрышев

АО «Концерн «Океанприбор» 197376 Санкт-Петербург, Чкаловский пр. 46

\*e-mail: gorelovacoustics@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2016 г.

Методом компьютерного моделирования рассматривается помехоустойчивость отдельного комбинированного приемника, состоящего из приемников звукового давления и колебательной скорости, и помехоустойчивость плоской звукопрозрачной антенны, состоящей из таких приемников. Результаты компьютерного моделирования подтверждают разработанный ранее аналитический метод расчета коэффициента помехоустойчивости гидроакустических антенн при мультипликативном алгоритме обработки процессов в их каналах. Показано, что при изменении в весьма широких пределах анизотропии поля помех, воздействующих на комбинированный приемник и антенну, максимальная помехоустойчивость обеспечивается не при мультипликативной, а при аддитивной обработке.

*Ключевые слова:* коэффициент помехоустойчивости, векторно-фазовый метод, приемник потока мощности, мультипликативная обработка, аддитивная обработка с оптимальными весами, комбинированная антенна

DOI: 10.7868/S0320791918020041

ВВЕДЕНИЕ

В литературе по гидроакустике нет единого мнения об эффективности комбинированных антенн и приемников. Разница в оценке их коэффициентов помехоустойчивости у различных исследователей достигает 10 дБ и более. Связано это в первую очередь с тем, что различные авторы [1–7] по-разному определяют коэффициент помехоустойчивости антенны и приемника и предлагают различные методы его расчета. В связи с этим представляется целесообразным рассмотрение вопроса о помехоустойчивости комбинированных антенн методом, отличным от принятых ранее – методом компьютерного моделирования.

Вообще говоря, оценка помехоустойчивости антенны зависит от того, в каком режиме она работает (обнаружение, точное пеленгование, связь, локация, классификация). Мы так же, как и в работе [7], будем рассматривать помехоустойчивость антенны в типовом тракте обнаружения слабого сигнала на фоне помех. Как обычно, будем предполагать, что сигнал и помеха представляют собой стационарные случайные нормальные независимые процессы и время интегрирования в накопителе велико по сравнению с интервалом корреляции помех. Типовой тракт состоит из устройства формирования характеристики направленности (при работе одиночного приемника оно отсутствует), квадратичного детектора (в случае мультипликативной обработки – пе-

ремножителя), накопителя и индикатора. Под индикатором мы будем понимать любое устройство, принимающее решение о наличии полезного сигнала. В отличие от работы [7] анализ производится не аналитическим, а более наглядным методом компьютерного моделирования, позволяющим анализировать алгоритмы более сложные, чем обычно рассматриваемые квадратичные. Рассматриваются простейшие антенны и простейшие поля акустических помех при различных алгоритмах обработки процессов.

Независимо от того, работает ли антенна одним каналом, состоящим из приемников давления  $P$  или приемников колебательной скорости  $V$ , формируется ли новый канал как их сумма  $P + V$  или произведение  $PV$ , на индикаторе в отсутствие сигнала наблюдается некоторое флуктуирующее напряжение, зависящее от мощности помех в поле. При появлении полезного сигнала это напряжение, продолжая флуктуировать, приподнимается на величину, зависящую от величины постоянной составляющей мощности полезного сигнала. В соответствии с критерием Неймана–Пирсона порог обнаружения типового тракта устанавливается исходя из заданной вероятности ложных тревог и величины флуктуаций процесса на индикаторе. Поэтому в технике вообще [8] и в гидроакустике в частности [10–12] помехоустойчивость приемного тракта оценивается отношением приращения процесса на индикаторе, вызванного появлением

полезного сигнала, к его среднеквадратическому отклонению в отсутствие сигнала. Не к средней мощности помех, а именно к среднеквадратическому отклонению. Такой критерий оценки помехоустойчивости, по-видимому, не учитывается исследователями, которые считают, что “приемник потока мощности” (комбинированный приемник при мультипликативной обработке процессов в каналах  $P$  и  $V$ ) обладает весьма высокой помехоустойчивостью. Действительно, в изотропном или близких к нему полях помех средняя мощность помех на индикаторе тракта, работающего с таким приемником, мала или близка к нулю, но так как определяющим является не средняя мощность, а среднеквадратическое отклонение, из этого не следует, что помехоустойчивость приемника весьма велика или стремится к бесконечности.

В соответствии с приведенным выше критерием оценки помехоустойчивости тракта обнаружения слабого сигнала на фоне помех будем понимать под коэффициентом помехоустойчивости  $\chi$  отношение отношений сигнал/помеха на выходе антенны при работе с каким-то алгоритмом (обозначим его для общности записи последующих формул символом  $A$ ) и на выходе одиночного приемника давления при обычном детектировании. Чувствительности антенны и приемника давления считаются одинаковыми. Под сигналом понимается приращение процесса на индикаторе при появлении полезного сигнала, а под помехой – среднеквадратическое отклонение процесса в отсутствие сигнала.

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Еще в восьмидесятые годы прошлого столетия выдающийся советский ученый Е.Л. Шендеров вывел формулу, определяющую коэффициент помехоустойчивости антенны, в тракте которой происходит перемножение процессов с выходов каналов  $P$  и  $V$ . Подробный ее вывод был опубликован только в 2002 году [7], но результаты исследований, выполненных с ее помощью, появились раньше [6, 13]. Записать ее можно следующим образом:

$$\chi_{PV} = \sqrt{\frac{2\chi_P\chi_V}{1 + r_{PV}^2 - x_{PV}^2}}, \quad (1)$$

где  $\chi_P$  и  $\chi_V$  – коэффициенты помехоустойчивости при работе каналов  $P$  и  $V$ ; соответственно, определяются они известными для аддитивной обработки выражениями:

$$\chi_P = \frac{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_P^2 d\Omega}, \quad (2)$$

$$\chi_V = \frac{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_V^2 d\Omega}; \quad (3)$$

$r_{PV}$  и  $x_{PV}$  – вещественная и мнимая части коэффициента корреляции процессов в каналах  $P$  и  $V$  в отсутствие полезного сигнала,

$$r_{PV} + ix_{PV} = \frac{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_P(\Omega) R_V^*(\Omega) d\Omega}{\sqrt{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_P^2(\Omega) d\Omega} \sqrt{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_V^2(\Omega) d\Omega}}, \quad (4)$$

$\mathfrak{S}(\Omega)$  – пространственный спектр помех,  $R_P(\Omega)$  и  $R_V(\Omega)$  – характеристики направленности каналов  $P$  и  $V$ , нормированные в направлении прихода сигнала. Символ “звездочка” означает комплексное сопряжение. Формула (1) выведена в предположении, что каналы  $P$  и  $V$  имеют одинаковую чувствительность.

Вывод формулы (1) основан на хорошем знании теории случайных процессов и не понятен для многих специалистов-акустиков. В связи с этим и представляется целесообразным исследовать помехоустойчивость комбинированного приемника не аналитическим, а принципиально другим способом – способом компьютерного моделирования, а также сравнить результаты, полученные методом компьютерного моделирования, с результатами расчетов по формуле Е.Л. Шендера.

### ПОЛЕ ПОМЕХ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРИЕМНИК И АНТЕННУ

Поле помех в месте расположения антенны можно задать двумя способами: набором функций корреляции или с помощью пространственного спектра помех  $\mathfrak{S}(\Omega)$ . Для решения задачи о помехоустойчивости антенны значительно удобнее пользоваться пространственным спектром.

Будем рассматривать коэффициент помехоустойчивости комбинированных приемников и антенн в простейших полях помех: изотропном, когда  $\mathfrak{S}(\Omega) = 1$ , и в поле помех моря модели Крона–Шермана. В этой модели предполагается, что на поверхности раздела вода–воздух равномерно распределены независимые источники, имеющие направленность вида  $\cos^n(\alpha)$ , где  $n$  – коэффициент, зависящий от волнения морской поверхности. Можно показать [12], что в этом случае пространственный спектр помех определяется выражением  $\mathfrak{S}(\Omega) = \cos^{2n-1}\theta$  при  $\theta \leq \pi/2$  и  $\mathfrak{S}(\Omega) = 0$  при  $\theta > \pi/2$ .

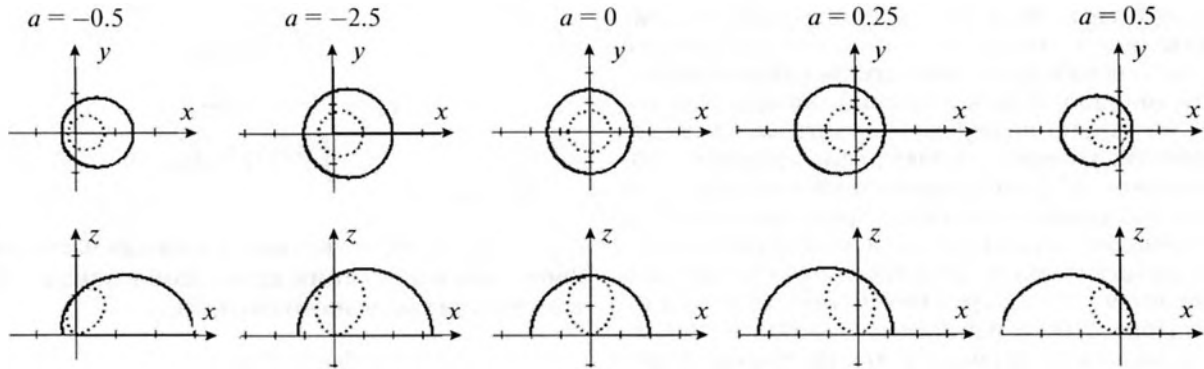


Рис. 1. Вид пространственных спектров в конических сечениях при  $\theta = \pi/4$  (верхний ряд) и в сечениях вертикальной плоскостью (нижний ряд,  $\varphi = 0$ ).

Здесь  $\theta$  – угол между произвольным направлением в пространстве и осью  $z$ , направленной вверх из точки, в которой расположен центр антенны. Из этой формулы следует, что в конических сечениях при  $\theta = \text{const}$  поле помех изотропно и что при  $n = 0.5$  это поле вообще изотропно в верхнем полупространстве.

Во многих работах отмечается, что в реальных условиях в шумах моря наблюдается анизотропия не только в вертикальной плоскости. В связи с этим целесообразно усложнить модель Крона–Шермана, введя анизотропию в горизонтальной плоскости. Мы будем рассматривать помехоустойчивость одиночного приемника и антенны в полях, имеющих пространственный спектр вида

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}(\theta, \varphi) &= \cos^{2n-1} \theta \frac{1 - a \cos \varphi \sin \theta}{1 + a \cos \varphi \sin \theta} \\ &\text{при } \theta \leq \pi/2, \\ \mathfrak{S}(\theta, \varphi) &= 0 \text{ при } \theta > \pi/2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a$  – некоторый параметр, принимающий значения от  $-1$  до  $1$ . Угол  $\varphi$  отсчитывается в горизонтальной плоскости от оси  $x$ .

На рис. 1 представлены пространственные спектры помех в конических сечениях  $\theta = \pi/4$  (верхний ряд), а также в сечениях вертикальной плоскостью при  $\varphi = 0$  (нижний ряд) при различных значениях коэффициента  $a$ . Для наглядности кривые нормированы в различных направлениях. Сплошными линиями показаны сечения для  $n = 0.5$ , пунктирными – для  $n = 1.5$ . С ростом коэффициента  $a$ , при  $a > 0$ , пространственный спектр формируется так, что помехи в основном приходят из тыльного полупространства  $x < 0$ . С уменьшением  $a$ , при  $a < 0$ , – наоборот, из переднего полупространства  $x > 0$ . Как видно из рисунка, при изменении параметров  $n$  и  $a$  пространственный спектр изменяется в весьма широких пределах. Сигнал приходит из направления, совпадающего с осью  $x$  со стороны больших значений  $x$ .

В литературе рассматриваются случаи, когда комбинированный приемник состоит из нескольких (от одного до трех) приемников колебательной

скорости. Мы будем рассматривать случай, когда приемник колебательной скорости один, и ориентирован вдоль оси  $x$ , при этом полезный сигнал поступает из направления максимума характеристики направленности приемника.

Мы будем рассматривать только случаи, когда характеристики направленности приемника и антенны симметричны относительно плоскости  $\theta = \pi/2$ . При этом их помехоустойчивость в поле помех, описываемых формулой (5) при  $n = 0.5$ ,  $a = 0$ , совпадает с помехоустойчивостью в изотропном поле помех.

#### К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Тогда, в соответствии с приведенным выше определением помехоустойчивости, можно записать

$$\chi_A = \frac{C_{n+s}A - C_nA}{D_nA} \frac{D_nP}{C_{n+s}P - C_nP}, \quad (6)$$

где  $C_nA$  – среднее значение процесса на индикаторе при работе алгоритма  $A$  в отсутствие полезного сигнала, а  $C_{n+s}A$  – при его появлении.  $C_{n+s}A - C_nA$  – приращение средней мощности процесса на индикаторе при появлении полезного сигнала и при обработке процесса в соответствии с алгоритмом  $A$ .  $C_{n+s}P - C_nP$  – то же самое на выходе одиночного приемника звукового давления; соответственно,  $D_nA$  и  $D_nP$  – среднеквадратические отклонения процесса на индикаторе при работе антенны с алгоритмом  $A$  и одиночного приемника давления в отсутствие сигнала. Поскольку сигнал и помеха независимы, при аддитивных обработках  $C_{n+s}P - C_nP = C_sP$  – приращение средней мощности равно среднему значению мощности сигнала на индикаторе. Расчеты показали, что эта же зависимость сохраняется и при мультипликативной обработке, то есть  $C_{n+s}A - C_nA = C_sA$ , и так как чувствительность антенны и приемника давления полагаются равными, то  $C_sP = C_sA$ . Тогда

$$\chi_A = \frac{D_n P}{D_n A}. \quad (7)$$

Сущность компьютерного моделирования заключается в том, что давление, развиваемое каждым из источников помех, являющееся непрерывным случайным нормальным процессом, мы заменяем дискретным набором независимых случайных чисел с интервалом, превосходящим интервал корреляции помех. Далее рассматриваем развитие процесса в приемном тракте при переходе от одного момента времени к другому.

Для проведения компьютерного моделирования необходимо задаться полем помех. Так как мы считаем заданным пространственный спектр, записанный в сферической системе координат, логично полагать, что виртуальные источники помех, создающие такой спектр, располагаются на поверхности сферы большого радиуса. Разместим источники помех в точках пересечения  $m$  широт и  $2m$  меридианов. Пусть  $q$  – номер источника вдоль меридиана ( $q = 1, \dots, m$ ), а  $g$  – вдоль широты ( $g = 1, \dots, 2m$ ); тогда координаты источника с номером  $q, g$  определяются выражениями  $\theta_q = \pi(q - 0.5)/m$  и  $\varphi_g = \pi(g - 0.5)/m$ . Разделив угол, соответствующий меридиану, на  $m$ , мы разделили меридиан на равные участки, но источники целесообразно располагать не на краях участков, а на их серединах, поэтому в формулах для расчета  $\theta_q$  и  $\varphi_g$  введено слагаемое  $-0.5$ .

Мгновенное напряжение, создаваемое в момент  $t$  источником помехи с номером  $q, g$  на сумматоре антенны при использовании алгоритма  $A$ , можно записать следующим образом:

$$u'_{q,g} A = B'_{q,g} \sqrt{\xi(\theta_q, \varphi_g)} \sin \theta_q \gamma_a R_a(\theta_q, \varphi_g). \quad (8)$$

В этой формуле  $B'_{q,g}$  – случайное число, определяющее производительность источника помехи с номером  $q, g$  в момент времени  $t$ ;  $\gamma_a$  и  $R_a(\theta_q, \varphi_g)$  – чувствительность антенны и ее характеристика направленности. Сомножитель  $\sqrt{\sin \theta_q}$  компенсирует отсутствие эквидистантного расположения источников помех на сфере. Модуль множителя  $B'_{q,g}$  распределен по закону Рэлея, фаза – по равномерному закону в пределах от 0 до  $2\pi$ .

Мы будем рассматривать только антенны, для которых справедлива теорема умножения, и поэтому  $R_a(\theta_q, \varphi_g) = R_3(\theta_q, \varphi_g) R_p(\theta_q, \varphi_g)$ , где  $R_3(\theta_q, \varphi_g)$  – характеристика направленности элемента антенны,  $R_p(\theta_q, \varphi_g)$  – характеристика направленности мнимой антенны, ненаправленные элементы которой расположены в центрах реальных.

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДДИТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Рассмотрим процедуру компьютерного моделирования при аддитивном алгоритме на примере вычисления коэффициента помехоустойчивости антенны при работе каналом колебательной скорости  $V$ . В этом случае характеристика направленности приемника  $R_3(\theta_q, \varphi_g) = \sin \theta_q \cos \varphi_g$ , и из формулы (8) имеем

$$u'_{q,g} V = B'_{q,g} \sqrt{\xi(\theta_q, \varphi_g)} \sin \theta_q \times \gamma_a \sin \theta_q \cos \varphi_g R_p(\theta_q, \varphi_g).$$

Напряжение, создаваемое в момент времени  $t$  на выходе канала  $V$  всеми источниками помех, равно  $UV^t = \sum_{q=1}^m \sum_{g=1}^{2m} u'_{q,g} V$ . Мгновенная мощность на выходе детектора равна  $WV^t = |UV^t|^2$ .

Производятся два этапа осреднения мощности помех. Первый происходит в накопителе, где накапливается  $N$  реализаций, каждая из которых рассчитывается при новом наборе случайных чисел  $B'_{q,g}$ . Вычисляется среднее значение мощности помех за  $N$  реализаций:  $CWV = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |UV^t|^2$ . На втором этапе на индикаторе накапливается  $M$  таких средних значений, и определяется среднее из них  $CWV = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M CWV_m$  и среднее квадратическое отклонение от среднего

$$D_n V = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (CWV - CWV_m)^2}.$$

Одновременно, то есть при тех же наборах случайных величин  $B'_{q,g}$ , производится вычисление среднее квадратического отклонения  $D_n P$  в канале одиночного приемника давления, и по формуле (7) определяется коэффициент помехоустойчивости антенны при работе с алгоритмом колебательной скорости  $V$ .

Аналогично производится расчет и при других аддитивных алгоритмах. Кроме традиционного при работе только приемниками давления алгоритма  $P$  (в этом случае  $R_3(\theta_q, \varphi_g) = 1$ ), рассмотрим еще два аддитивных алгоритма: алгоритм  $K$ , при котором процессы в каналах  $P$  и  $V$  складываются с равными весами и подаются далее на детектор, и оптимальный алгоритм  $O$ , при котором эти процессы складываются с оптимальными весами. В первом случае характеристика элемента – кардиоида, и  $R_3(\theta_q, \varphi_g) = 1 + \sin \theta_q \cos \varphi_g$ , во втором –  $R_3(\theta_q, \varphi_g) = (b + \sin \theta_q \cos \varphi_g) / (b + 1)$ , где коэффициент  $b$  определяется формулой

$$b = \frac{\chi_P^{-1} - K_{PV}^{-1}}{\chi_V^{-1} - K_{PV}^{-1}},$$

в которой  $\chi_P$  и  $\chi_V$  — коэффициенты помехоустойчивости при работе алгоритмов  $P$  и  $V$ , определяемые формулами (2) и (3), а коэффициент  $K_{PV}^{-1}$  равен

$$K_{PV}^{-1} = \frac{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) R_P(\Omega) R_V(\Omega) d\Omega}{\int_{\Omega} \mathfrak{S}(\Omega) d\Omega}.$$

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ И СМЕШАННЫХ АЛГОРИТМОВ

Для расчета коэффициента помехоустойчивости антенны при работе с мультипликативным алгоритмом одновременно (то есть при одних и тех же случайных коэффициентах  $B_{q,g}^t$ ) производится расчет напряжений в трех каналах: в каналах  $P$  и  $V$  антенны и в канале одиночного приемника звукового давления. Далее при определении мгновенной мощности вместо детектирования производится умножение, и  $SWPV = \text{Re}[UP^*(UV^*)^*]$ . Последующие процедуры не отличаются от описанной ранее для аддитивного алгоритма.

Компьютерное моделирование позволяет исследовать и более сложные алгоритмы, чем аддитивный и мультипликативный. В литературе (в частности, [3]) описаны смешанные алгоритмы, обеспечивающие, по мнению авторов, весьма высокую помехоустойчивость. Первый из них (алгоритм  $C$ ) имеет вид  $PV + 5/3V^2$ . По существу, он является мультипликативным, так как может быть записан в виде  $V(P + 5/3V)$ , то есть как произведение двух аддитивных процессов. Второй алгоритм имеет вид  $V(P + 3V)^2(1 + 3V)^{-2}$ . В нем содержится слагаемое с напряжением выше третьей степени, в этом случае  $C_s P \neq C_s A$ , и коэффициент помехоустойчивости нельзя рассчитывать по формуле (7).

В общем случае при нелинейной обработке может не выполняться равенство  $C_{n+s}A - C_nA = C_sA$ , и тогда расчет коэффициента помехоустойчивости следует проводить не по формуле (7), а по формуле (6), в которую входят (при рассмотрении алгоритма  $V$ )  $C_{n+s}V$  и  $C_nV$ , то есть средние значения мощности процесса при наличии помех и сигнала и только помех.

Для расчета  $C_{n+s}V$  и  $C_{n+s}P$  следует в правой части формулы (8) прибавить некоторую величину  $S$  и далее произвести последовательно все те вычисления, которые приводились при расчете  $C_nV$ . Среднее значение сигнала на выходе ненаправленного приемника  $P$  при равенстве чувствительностей приемников  $P$  и  $V$  равно тому же значению  $S$ , а  $C_nP$  рассчитывается так же, как  $C_nV$ , но в формуле

(8) характеристика направленности  $R_p(\theta_q, \phi_g)$  полагается равной единице.

Расчеты показали, что второй из смешанных алгоритмов непригоден для обнаружения слабых сигналов, так как при его использовании коэффициент помехоустойчивости  $\chi$  зависит от отношения сигнал/помеха в поле, и при малых значениях этого отношения  $\chi < 1$  помеха подавляет сигнал.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОДИНОЧНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА

На графиках рис. 2 для  $n = 0.5$  (рис. 2а) и  $n = 1.5$  (рис. 2б) представлены зависимости от параметра  $a$  коэффициентов помехоустойчивости одиночного комбинированного приемника при его работе каналом давления  $P$ , каналом приемников колебательной скорости  $V$ , при равновесном  $K$  и оптимальном  $O$  сложении процессов в этих каналах, а также при смешанной  $C$  и мультипликативной  $PV$  обработках. Результаты компьютерного моделирования представлены прерывистыми линиями, результаты расчета по формулам (1)–(3) и (7) — сплошными.

Обращает на себя внимание прекрасное совпадение результатов компьютерного моделирования с аналитическими расчетами. Строго говоря, аналитические формулы справедливы при бесконечно большом времени осреднения. Моделирование подтвердило это обстоятельство. Расчеты показали, что чем больше отсчетов по времени, тем ближе результат к полученным при аналитическом расчете. При проведении расчетов, результаты которых представлены на рис. 2, полагаем  $N = 500$ ,  $M = 20$ ,  $m = 6$ .

Что касается соотношения величин коэффициентов помехоустойчивости при различных алгоритмах, то тут следуют два основных вывода.

Первый — коэффициент помехоустойчивости комбинированного приемника во всех случаях выше коэффициента помехоустойчивости одиночного приемника давления. В какой-то мере это объясняется тем, что комбинированный приемник на самом деле не один, в нем кроме приемника давления есть еще и приемник колебательной скорости.

Второй основной вывод — в подавляющем большинстве случаев коэффициент помехоустойчивости при мультипликативной обработке (приемник потока мощности) меньше (а по сравнению с оптимальной — значительно меньше) коэффициента помехоустойчивости при аддитивной обработке.

При использовании алгоритмов  $P$ ,  $V$  и  $PV$  коэффициент помехоустойчивости не зависит от того, с какой стороны (со стороны прихода сигнала или с противоположной) увеличивается помеха; при использовании остальных алгоритмов ко-

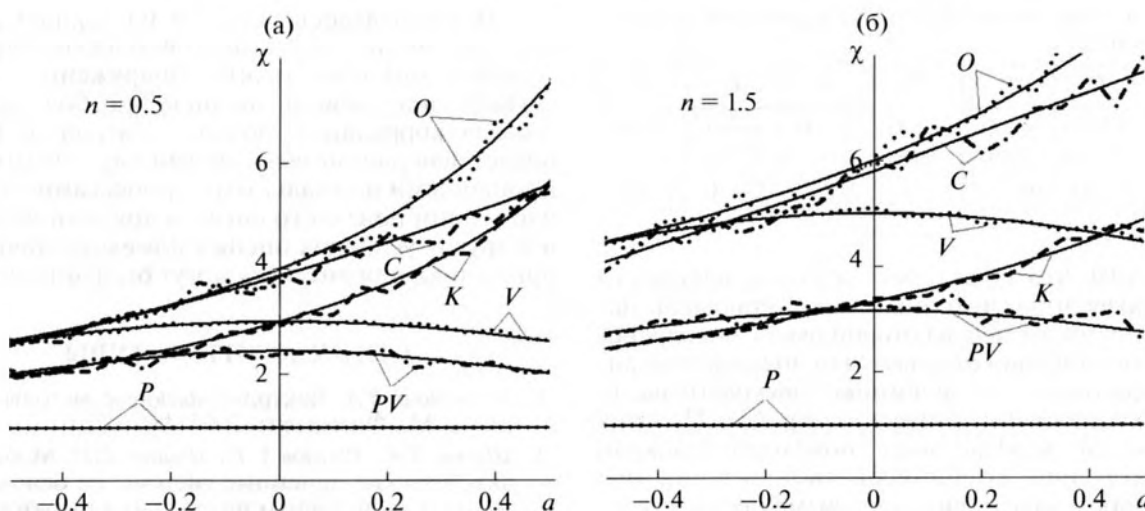


Рис. 2. Зависимость коэффициентов помехоустойчивости одиночного комбинированного приемника от параметра  $a$  при разных алгоритмах обработки процессов: (а)  $n = 0.5$ , (б)  $n = 1.5$ .

эффицент помехоустойчивости увеличивается в случаях, когда помеха поступает со стороны, противоположной приходу сигнала.

Недостатком оптимального аддитивного алгоритма является то, что весовой коэффициент  $b$  зависит от частоты.

В этом смысле преимуществом обладает алгоритм смешанный, уступает же он в величине коэффициента помехоустойчивости оптимальному в большинстве рассмотренных случаев незначительно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ

На графике рис. 3 представлена зависимость коэффициентов помехоустойчивости антенны в виде круга радиусом  $R$  в функции от  $R/\lambda$  при сравнительно малых значениях  $R/\lambda$  и при  $n = 0.5, a = 0$ . Как и на графиках рис. 2, сплошные линии соответствуют аналитическому расчету, прерывистые – компьютерному моделированию. Как и в случае одиночного приемника, результаты, полученные различными способами, весьма близки друг к другу. Область изменения  $R/\lambda$  от 0 до 0.5–1 является переходной от одиночного приемника к антенне, у которой сформирован главный максимум характеристики направленности. В этой области некоторые кривые, определяющие коэффициенты помехоустойчивости, пересекаются между собой, однако всегда помехоустойчивость при мультипликативной обработке оказывается ниже, чем при аддитивной с оптимальными весами или смешанной. Примерно так же ведут себя кривые и при  $n = 1$  и  $n = 1.5$ . При  $R/\lambda > 1$  соотношения между коэффициентами помехоустойчивости при разных обработках оказываются постоянными.

В таблице приведены результаты расчетов коэффициентов помехоустойчивости рассматрива-

емой антенны при различных алгоритмах обработки процессов и при различных степенях анизотропии в вертикальной плоскости  $n$ . Расчеты выполнены для случая  $R = 2\lambda, a = 0$ . Так же, как и в предыдущих расчетах,  $N = 500, M = 20$ , но  $m = 20$ . Буквой  $G$  в таблице обозначен коэффициент концентрации звукопрозрачной антенны, равный  $0.5(kR)^2$ .

С ростом коэффициента анизотропии  $n$  коэффициент помехоустойчивости при всех алгоритмах обработки возрастает. Минимальной помехоустойчивостью обладает антенна при работе канала  $P$ .

Максимальная помехоустойчивость поверхностной комбинированной звукопрозрачной антенны, как и отдельного комбинированного приемника, наблюдается при оптимальном распределении.

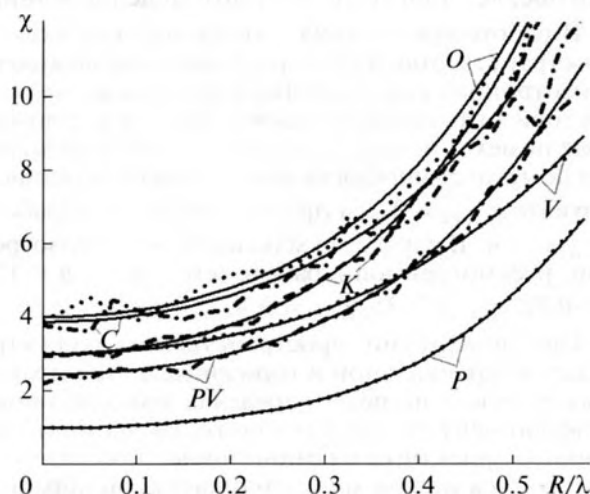


Рис. 3. Зависимость коэффициентов помехоустойчивости от волнового размера антенны в виде круга при различных алгоритмах обработки процессов.

**Таблица 1.** Результаты расчетов коэффициентов помехоустойчивости

$n$	$P$	$V$	$PV$	$K$	$C$	$O$
0.5	1G	1.1 G	1.5 G	2.1 G	1.6 G	2.1 G
1.0	3.8 G	5.4 G	6.4 G	8.9 G	7.7 G	9.2 G
1.5	7.6 G	16.7 G	16 G	21 G	22.6 G	24 G

Заметим, что характеристика направленности звукопрозрачной антенны, характеристика направленности элемента которой имеет вид кардиоиды, несущественно отличается от аналогичной антенны, состоящей из приемников звукового давления и обладающей акустическим экраном. Поэтому практически коэффициент помехоустойчивости звукопрозрачной комбинированной антенны при оптимальном аддитивном алгоритме несущественно отличается от коэффициента помехоустойчивости антенны звукового давления в экране.

Кроме антенн с акустическим экраном, в практическом плане альтернативой комбинированной антенне является антенна двухслойная, состоящая из однотипных приемников, поэтому выбор типа антенны осуществляется разработчиком исходя из конкретных технических требований.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Компьютерным моделированием подтверждено, что предложенный Е.Л. Шендеровым аналитический метод расчета помехоустойчивости правильно учитывает процессы, происходящие в типовом тракте обнаружения слабых сигналов (сложение, перемножение, детектирование и двукратное накопление). При дальнейших исследованиях целесообразно пользоваться аналитическим методом, так как трудоемкость его значительно меньше, чем при компьютерном моделировании.

В работе предложена математическая модель пространственного спектра помех, обладающего анизотропией как в вертикальной плоскости, так и в горизонтальных сечениях. Так, в изотропном поле помех (см. рис. 2,  $n = 0.5$ ,  $a = 0$ ) коэффициент помехоустойчивости при мультипликативной обработке  $\chi_{PV} = 2.2$ , а при оптимальной обработке  $\chi_{PV} = 4$ . В случае же максимальной анизотропии, рассмотренной в работе (см. рис. 2,  $n = 1.5$ ,  $a = 0.5$ ),  $\chi_{PV} = 2.35$ ,  $\chi_{PV} = 8.4$ .

При изменении пространственного спектра помех в вертикальной и горизонтальной плоскостях в весьма широких пределах максимальный коэффициент помехоустойчивости комбинированного приемника и комбинированной антенны достигается не при мультипликативной обработке, как это показано во многих публикациях, а при использовании аддитивного оптимального или смешанного алгоритма.

Как указывалось выше, в настоящей работе рассматривалась помехоустойчивость применительно к типовому тракту обнаружения слабого сигнала при времени накопления, большем интервала корреляции помехи. Сигнал и помехи представлялись независимыми случайными стационарными нормальными процессами. При обнаружении полезного сигнала другими методами и в других условиях оценки помехоустойчивости приемника или антенны могут быть иными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. Шуров В.А., Щеглов С.Г., Иванов Е.Н. Мобильные акустические приемные системы на основе автономных необитаемых подводных аппаратов // Науч.-техн. сб. "Подводные исследования и робототехника". 2014. № 2 (14). С. 4–12.
3. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В. Моделирование направленных свойств комбинированного приемника при смешанных алгоритмах обработки сигналов // Сборник докладов 6-й Всероссийской научно-технической конференции "Технические проблемы мирового океана". Владивосток, 2015. С. 171–175.
4. Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Селезнев И.А. Способ повышения помехоустойчивости цилиндрической гидроакустической антенны // Науч.-техн. сб. "Гидроакустика". 2015. № 21 (1). С. 37–45.
5. Смаришев М.Д. Помехоустойчивость цилиндрической звукопрозрачной антенны, состоящей из комбинированных приемников // Науч.-техн. сб. "Гидроакустика". 2017. № 29 (1). С. 5–9.
6. Смаришев М.Д., Шендеров Е.Л. Помехоустойчивость плоских антенн в анизотропном поле помех // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 4. С. 502–506.
7. Шендеров Е.Л. О помехоустойчивости антенны, состоящей из приемников звукового давления и приемников колебательной скорости // Науч.-техн. сб. "Гидроакустика". 2002. № 3. С. 24–40.
8. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 478 с.
9. Гаткин Н.Г., Геранин В.А., Карновский М.И., Красный Л.Г. Помехоустойчивость типового тракта обнаружения сигналов. Киев: Техника, 1971. 200 с.
10. Мельтреггер И.Н. О действии шума, обусловленного волнением моря, на акустическую антенну // Науч.-техн. сб. "Вопросы судостроения" ЦНИИ "Румб". Серия общетехническая. 1976. № 22. С. 25–33.
11. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 446 с.
12. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984. 300 с.
13. Песоцкий А.В., Смаришев М.Д. Сопоставительная оценка эффективности приемных антенн, состоящих из комбинированных приемников, в свободном поле и вблизи плоского экрана // Акуст. журн. 1985. Т. 35. № 3. С. 495–498.
14. Баскин В.В., Смаришев М.Д. Помехоустойчивость плоской антенны, состоящей из комбинированных приемников // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 629–636.