

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.2; 534.6

СРАВНЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ
В ВОЛНОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ
ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ АНТЕНН

© 2013 г. Н. И. Белова, Г. Н. Кузнецов

Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

119991 Москва, ул. Вавилова 38

E-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2012 г.

Анализируются экспериментально зарегистрированные пространственные отклики линейных скалярной, векторно-скалярной и комбинированной антенн. Комбинированная антенна образована из протяженной скалярной антенны и одного или группы векторно-скалярных модулей. Показано, что комбинированная антенна, выполняющая мультипликативную обработку сигналов, как и векторно-скалярная антенна по сравнению со скалярной антенной, подавляет зеркальные лепестки и обеспечивает однонаправленный прием. Одновременно уменьшается уровень бокового поля, что повышает помехоустойчивость.

Ключевые слова: векторно-скалярные и комбинированные модули и антенны, однонаправленный прием, подавление зеркального лепестка, снижение бокового поля характеристик направленности.

DOI: 10.7868/S0320791913020032

ВВЕДЕНИЕ

Структура звукового поля в многолучевом волноводе определяется не только пространственно-частотными зависимостями пульсаций давления, но и распределением в вертикальной и горизонтальной плоскостях модуля и фазы колебательной скорости. Поэтому полную информацию о характеристиках широкополосного звукового поля в точке приема в море можно получить с использованием одиночных четырехкомпонентных векторно-скалярных модулей или векторно-скалярных антенн (соответственно ВСМ и ВСА). Определенное представление о пространственных характеристиках поля формируется при использовании объемных с большим коэффициентом заполнения многоэлементных скалярных антенных решеток.

ВСМ и ВСА часто называются векторно-фазовыми приемниками или антеннами [1–3]. С использованием таких модулей и антенн можно получить и исследовать однонаправленность приема сигналов. Это особенно важно для линейных антенн, которые, как известно, имеют наибольший коэффициент использования гидрофонов, максимальную разрешающую способность и точность пеленгования. Этим объясняется их широкое применение в качестве стационарных донных или буксируемых антенн [4, 5]. Однако линейные скалярные антенны (СА) формируют ложный “зер-

кальный” лепесток, что не позволяет разделять источники звука, расположенные “спереди” и “сзади” (стационарные антенны) или “слева” и “справа” (буксируемые антенны). В [6, 7] показано, что однозначное определение направления на источник обеспечивается ВСМ и ВСА, которые разделяют сигналы, приходящие с противоположных направлений. Однако на использование многоканальных ВСА в отдельных случаях накладываются технические ограничения, например на размеры поперечного сечения антенны. Кроме того, ВСА, как правило, дороже и сложнее в настройке и эксплуатации, хотя имеют несомненные преимущества.

Рассмотрим альтернативный вариант, основанный на совместном применении протяженной линейной многоэлементной скалярной антенны и одного или нескольких разнесенных в пространстве ВСМ. Как известно, Харкевич А.А. назвал группу, образованную скалярным (монополюсным) приемником и приемниками первого или второго порядка, комбинированным приемником [8]. Представляется, что по аналогии можно назвать антенну, составленную из СА и ВСМ, комбинированной антенной. Поскольку число приемных элементов в протяженной многоканальной СА при такой постановке задачи много больше, чем в сосредоточенном ВСМ, то следует использовать

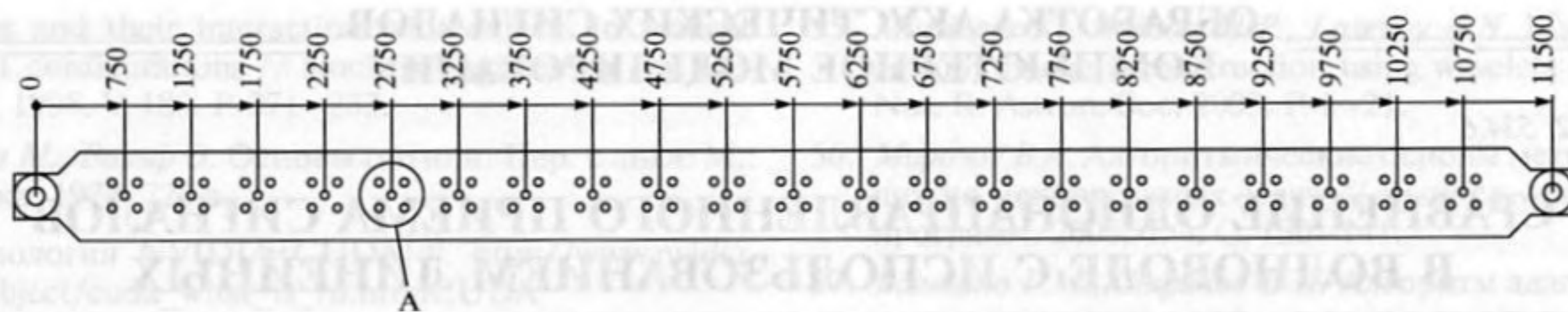


Рис. 1. Схема векторно-скалярной антенны МА-1 с ортогональными ВП. Стрелка А выделяет векторно-скалярный модуль, цифры указывают расстояние фазового центра ВСМ от начала антенны.

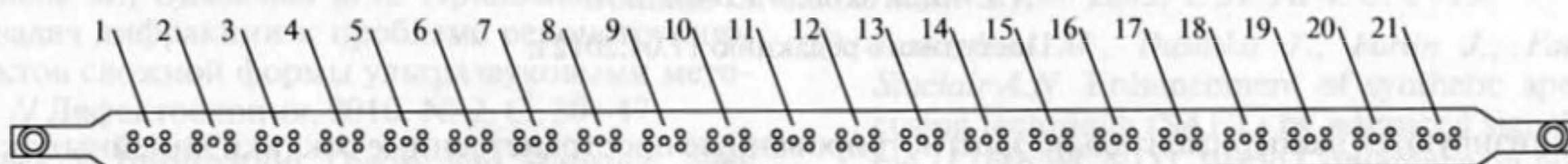


Рис. 2. Схема векторно-скалярной антенны МА-2 с не ортогональными векторными приемниками. Цифрами указаны номера векторно-скалярных модулей.

не аддитивную, а мультипликативную обработку [9].

Выполним сравнительную оценку характеристик направленности (ХН) СА, ВСА и мультипликативной комбинированной антенны при условии равенства диапазонов рабочих частот, апертур и межэлементных расстояний. Для этого сравним расчетные и экспериментальные значения основных максимумов и боковые поля ХН СА, ВСА и пространственных откликов, образованных совместно СА и ВСМ (отклик мультипликативной комбинированной антенны). Эксперименты проведем в стационарных условиях, когда фазовые центры антенн и излучателя неподвижны, и в режиме буксировки приемных антенн, пеленгующих движущийся источник шума.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Эксперименты проведены в условиях пресноводного озера с двумя макетами антенн (МА-1 и МА-2) одного вида, но с разной геометрией ВСМ. Макеты имели апертуру 10 м, 21 скалярный приемник или 21 трехкомпонентный ВСМ. Межэлементные расстояния равны 0,5 м. Каждый ВСМ образован приемником звукового давления (скалярный приемник — СП) и двумя горизонтально ориентированными приемниками градиента давления (векторными приемниками — ВП). Фазовые и геометрические центры СП и ВП совмещены (рис. 1, 2). Обе антенны имеют поперечное сечение, близкое по форме к плоскому сегменту. Это существенно повышает их устойчивость в пространстве при буксировке и удобно при морской постановке антенны на дно. Антенны являются цельнозалитыми и эластичными. Внутри антенн

располагаются три ряда скалярных приемников, предварительные усилители, соединительные провода и тросовое соединение. Крепление антенны к буксирному кабель-тросу производится с использованием специального “оголовника”.

Первый макет (рис. 1) состоял из ВСМ с ортогональными градиентными каналами, развернутыми под 45° к оси антенны (МА-1). В [6, 7, 10, 11] представлены некоторые результаты экспериментов с этой антенной. Во второй ВСА (рис. 2) градиентные каналы не ортогональны и развернуты к оси антенны на $17,5^\circ$ (МА-2). В этом варианте при заданных поперечных размерах антенны увеличивается расстояние между приемниками, образующими градиентную пару. Как следствие, МА-2 по сравнению с МА-1 имеет повышенную чувствительность на низких частотах. На рис. 3 приведена фотография двух антенн, намотанных на катушку, а также представлен участок антенны вблизи вертикальной поворотной штанги.

Система координат, в которой выполняется пеленгование, выбрана так, что ось x расположена вдоль продольной оси антенны. При исследовании характеристик направленности угол поворота источника отсчитывается от оси x . При вычислении ХН СА использовались сигналы 21 СП, входящих в состав каждого ВСМ и расположенных в среднем ряду трехрядной антенны. ВСМ образовывался из пяти скалярных приемников (рис. 1, стрелка А), один из которых — центральный — использовался как приемник звукового давления, а четыре других формировали два ВП.

В комбинированной антенне для выполнения мультипликативной обработки и вычисления совместного пространственного отклика от СА и ВСМ использовались сигналы от 21 СП и от од-

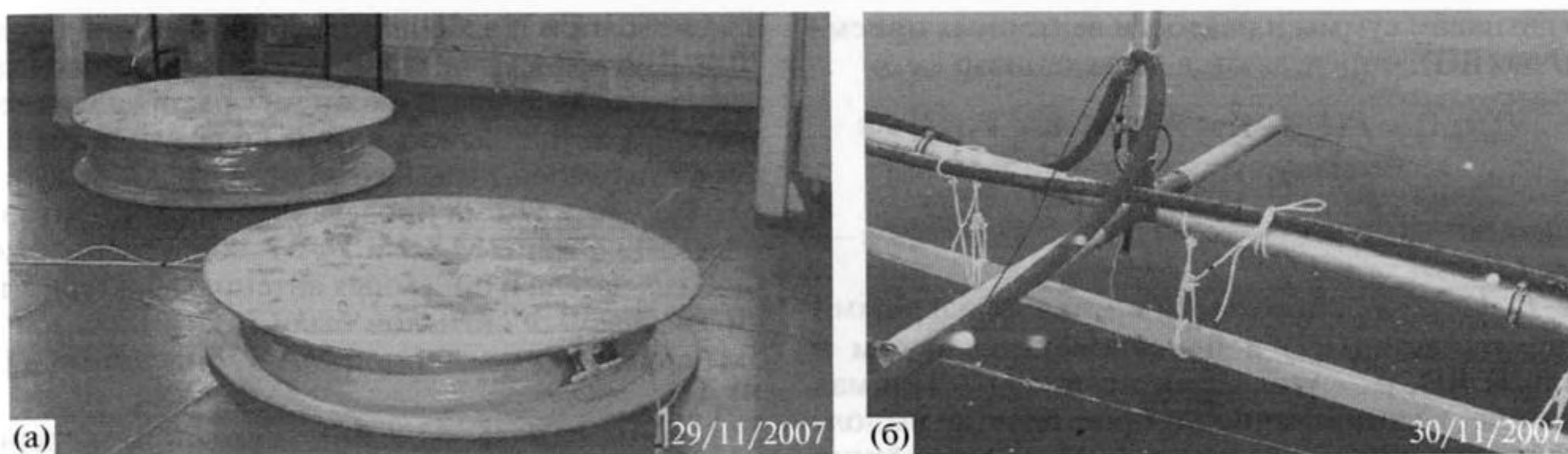


Рис. 3. Внешний вид векторно-скалярных антенн: (а) намотанные на барабаны антенны МА-1 и МА-2; (б) антенна (внизу), установленная на ферме и поворотном устройстве (вверху), перед погружением.

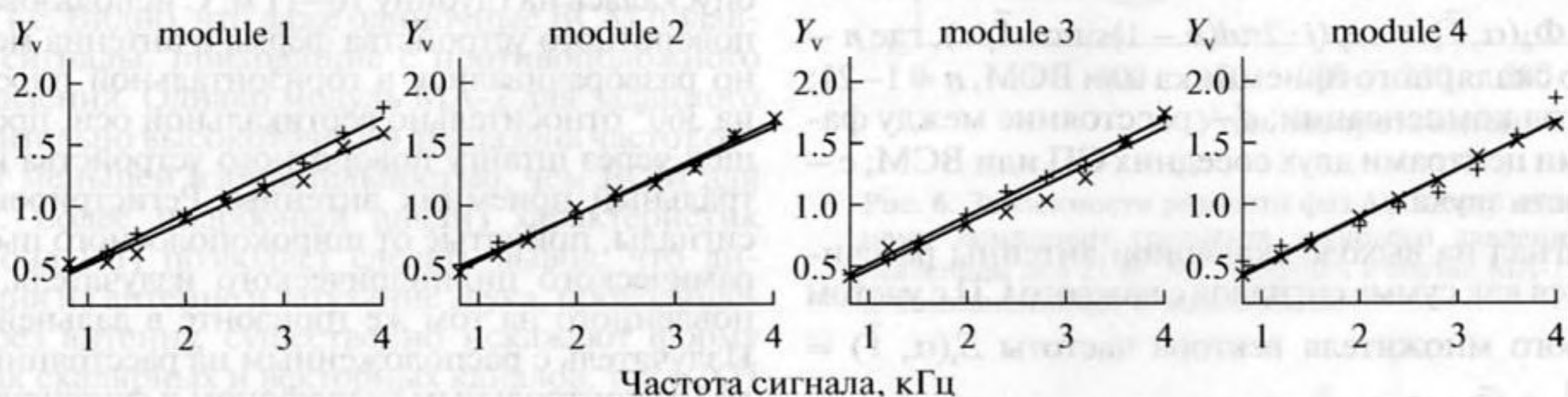


Рис. 4. Типичные частотные характеристики чувствительности Y_v ортогональных векторных каналов антенны МА-1 (модули 1–4) в диапазоне частот 0.8–4 кГц.

ного до пяти трехкомпонентных ВСМ. Использование такой конструкции антенн и совмещение элементов СА, ВСА и комбинированной антенны позволило производить эксперименты и обработку сигналов при одинаковой сигнально-помеховой обстановке, что повышает достоверность сравнения полученных результатов.

Для формирования ХН ВСА в заданном направлении и сканирования по пространству необходимо из двух ВП и одного СП сформировать суммарную ХН (кардиоиду) каждого приемного ВСМ, ориентированную в том же направлении, куда направлена ХН антенны. Как показало компьютерное моделирование, сканирование по пространству можно осуществлять не только для отдельных ВП, но и для суммы и разности градиентных каналов $V_x = V_1 + V_2$, $V_y = V_1 - V_2$, которые для МА-1 и МА-2 взаимно перпендикулярны (V_1 и V_2 – сигналы от первого и второго ВП в n -м модуле). Такой способ позволяет выполнить обработку сигналов от двух различающихся геометрией модулей антенн одноптипным образом. Для построения кардиоид с учетом результатов абсолютной калибровки приемников звука предварительно измерялись и рассчитывались коэффициенты, выравнивающие разницу величин сигнала на выходе скаляр-

ных и векторно-скалярных приемников. Проверка характеристик каждого канала и настройка антенн производилась при выполнении экспериментов непосредственно в озерных условиях. Методика настройки изложена в [10]. Частотная зависимость отношения максимальных величин давления и сформированных градиентных каналов в рабочем диапазоне частот, как известно [1, 2], аппроксимируется линейной функцией от частоты. Выравнивающие взвешивающие коэффициенты для каждого модуля антенны определяются, как $\bar{K}_{X,n}(\vec{f}) = a_{X,n} \cdot \vec{f} + b_{X,n}$ и $\bar{K}_{Y,n}(\vec{f}) = a_{Y,n} \cdot \vec{f} + b_{Y,n}$, где n – номер ВСМ, $n = 1-21$; \vec{f} – вектор частот спектральных отсчетов в выбранной полосе частот. Далее в разделе 2 (рис. 4) представлены примеры результатов измерений чувствительности приемных ортогональных векторных каналов для антенны МА-1 в зависимости от частоты звука. Аналогичные результаты получены и для МА-2. Аппроксимация этих зависимостей используется для расчета значений $a_{X,n \text{ mod}}$ и $b_{X,n \text{ mod}}$ для каждого модуля, что позволяет вычислить выравнивающие коэффициенты $\bar{K}_{X,n \text{ mod}}$.

ХН одиночных ВСМ для развернутых в направлении компенсации кардиоид, построенные

по сигналам суммы и разности векторных приемников (ВП), определяются выражением:

$$D_n(\alpha, \vec{f}) = P(\vec{f}) + (\vec{K}_{Y,n}(\vec{f}) \cdot (V_1(\vec{f}) - V_2(\vec{f})) \cdot \cos \alpha - \vec{K}_{X,n}(\vec{f}) \cdot (V_1(\vec{f}) + V_2(\vec{f})) \cdot \sin \alpha) \cdot \exp(-j \cdot \pi/2),$$

где P , V_1 , V_2 – сигналы, принятые скалярными приемниками (СП) и одновременно первым и вторым ВП; α – угол компенсации, j – мнимая единица. Сканирование по пространству выполнялось кардиоидой каждого ВСМ одновременно со сканированием СА или ВСА. Угловая компенсация СА обеспечивалась путем умножения всех Фурье-компонент приемного сигнала на зависящий от частоты фазовый множитель вектора ширины $\Phi_n(\alpha, \vec{f}) = \exp(j \cdot 2\pi d(n-1) \sin \alpha \cdot \vec{f}/c)$, где n – номер скалярного приемника или ВСМ, $n = 1-21$; α – угол компенсации; d – расстояние между фазовыми центрами двух соседних СП или ВСМ; c – скорость звука.

Сигнал на выходе скалярной антенны рассчитывался как сумма сигналов с каждого СП с учетом фазового множителя вектора частоты $S_s(\alpha, \vec{f}) = \sum_{n=1}^{21} P_n(\vec{f}) \cdot \Phi_n(\alpha, \vec{f})$. Здесь производится суммирование частотных компонент со всех элементов антенны от $n = 1$ до $n = 21$ с усреднением по частоте. Сигнал на выходе ВСА и векторно-скалярной части мультипликативной комбинированной антенны $S_{vs}(\alpha, \vec{f})$ рассчитывался по формуле $S_{vs}(\alpha, \vec{f}) = \sum_{n=1}^{m} D_n(\alpha, \vec{f}) \cdot \Phi_n(\alpha, \vec{f})$. Диапазон суммирования зависит от того, какая антенна рассчитывается – для ВСА суммируются сигналы с $m = 21$ трехкомпонентных модулей, для мультипликативной комбинированной антенны – для тех ВСМ, которые участвуют в формировании векторно-скалярной части ($m = 1-5$). Суммирование сигналов на выходе антенн СА, ВСА и комбинированной антенны происходит в одинаковых полосах частот. Отклик сигналов $S_m(\alpha)$ на выходе мультипликативной комбинированной антенны записывается в виде $S_m(\alpha) = \bar{S}_{vs}(\alpha) \cdot \bar{S}_s(\alpha)$, где $\bar{S}_{vs}(\alpha)$ – усредненный по частоте сигнал векторно-скалярной части антенны, $\bar{S}_s(\alpha)$ – усредненный по частоте сигнал от скалярной антенны.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫМИ АНТЕННАМИ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Эксперименты со скалярной, векторно-скалярной и мультипликативной комбинированной антеннами в стационарных условиях проведены в

пресноводном водоеме с глубиной места около 20 м. Дно водоема песчано-илистое. Волновод характеризовался однородным распределением скорости звука, вычисленной по результатам измерения температуры и солености в водном слое – $c = 1437$ м/с. Схема проведения экспериментов с макетами антенн МА-1 и МА-2, зоны расположения излучателя и приемных антенн, характеристики излучаемых сигналов были такими же, как в экспериментах с антенной МА-1, описанных в [7, 10, 11].

Дадим краткое описание методики экспериментов с антеннами МА-1 и МА-2. Эластичные ВСА двух типов поочередно устанавливались на горизонтальной ферме, которая крепилась к вертикальной штанге поворотного устройства. Ферма опускалась на глубину 10–11 м. С использованием поворотного устройства ферма и антенна медленно разворачивались в горизонтальной плоскости на 360° относительно вертикальной оси, проходящей через штангу поворотного устройства и центральный приемник антенны. Регистрировались сигналы, принятые от широкополосного пьезокерамического цилиндрического излучателя, установленного на том же горизонте в дальней зоне. Излучатель с расположенным на расстоянии около 1 м контрольным гидрофоном и фиксирующим грузом опускался с рейдовой бочки на фале известной длины. Сигналы на излучатель передавались по кабелю от усилителя мощности, установленного в лабораторном помещении на едином пульте управления. Кабель был проложен по дну волновода от усилителя до бочки, расположенной на расстоянии около 200 м от антенны. По этому же кабелю принимались сигналы от контрольного гидрофона.

Приемные каналы антенн МА-1 и МА-2 предварительно калибровались в гидроакустическом бассейне или непосредственно в районе выполнения работ [10]. В частности, измерялись частотные зависимости чувствительности СП и ВП антенн МА-1 и МА-2, а для антенны МА-2 измерялись и рассчитывались также частотные зависимости чувствительности векторной суммы и векторной разности. Типичные зависимости чувствительности векторного приемника Y_v от частоты для ортогональных каналов антенны МА-1 приведены на рис. 4.

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты формирования кардиоидных характеристик, полученных при суммировании сигналов в полосе частот по двум предельным направлениям – вдоль и перпендикулярно к апертуре антенны. На рисунке изображены кардиоиды, рассчитанные после обработки сигналов от удаленного широкополосного точечного излучателя, расположенного в дальней зоне. Здесь и далее обработка проводилась в спектральной области в диапазоне частот 1.3–1.7 кГц. Полоса анализа – 1 Гц. Дли-

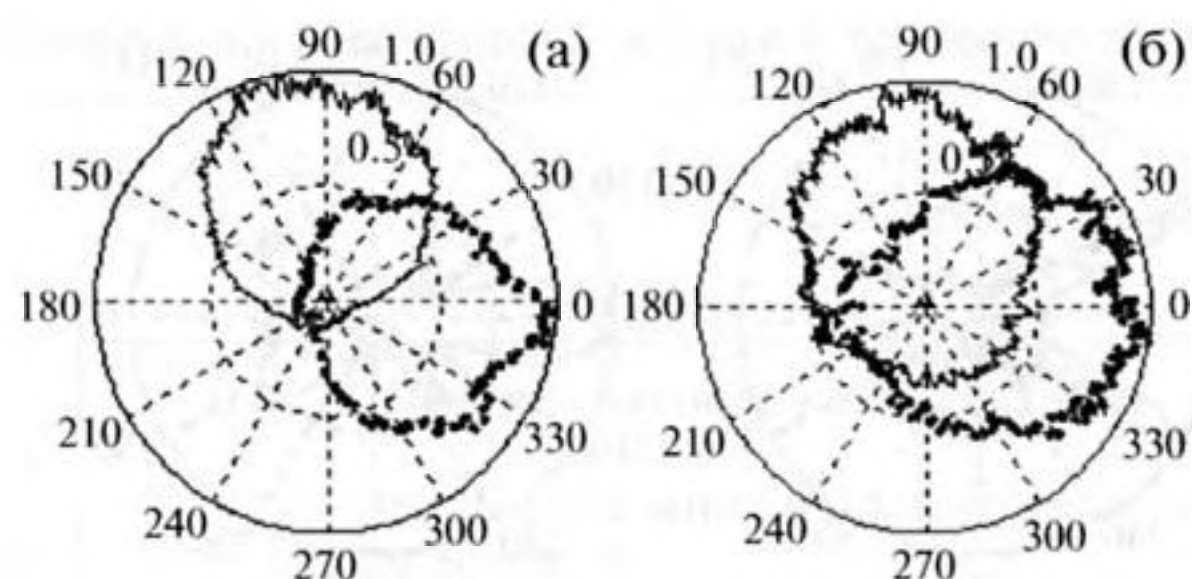


Рис. 5. Кардиоидные характеристики ВСМ антенн двух видов в направлении вдоль (0°) и перпендикулярно к апертуре антенны (90°): (а) ВСМ для МА-1, (б) ВСМ для МА-2.

тельность интервала накопления мощности сигналов — 1 с. Видно, что даже одиночные ВСМ подавляют сигналы, приходящие с противоположного направления. Однако модуль МА-2 для заданного сравнительно высокоточного диапазона частот обладает меньшей избирательностью, чем ВСМ для МА-1. Более подробный анализ характеристик кардиоид [11] позволяет сделать вывод, что дифракция на антенне и затухание звука, проходящего через антенну, существенно искажают форму ХН как скалярных и векторных каналов, так и ХН кардиоид, особенно при скользящих углах падения волны. Однако фазовые соотношения, в частности скачок фазы от $+\pi/2$ до $-\pi/2$ (или наоборот) при проходе зон минимумов ХН векторных каналов, достаточно устойчивы, что, собственно, и позволяет формировать кардиоиды, несмотря на искажение формы ХН отдельных каналов.

На рис. 6 для антенны МА-1 изображены разности фаз сигналов, принятых ортогональными ВП, относительно сигнала от скалярного приемника. Видно, что, несмотря на разброс, указанные зависимости разности фаз хорошо согласуются с теоретическими зависимостями [1, 2]. Аналогичные фазовые характеристики получены для каналов суммы и разности. Введение разности фаз $\Delta\phi$ между ортогональными ВП (антенна МА-1) или разности фаз между векторной суммой и векторной разностью векторных приемников МА-1 или МА-2 позволяет разворачивать ХН кардиоиды в пределах от 0° до 360°, совмещая ее с ХН антенны в целом.

Ранее сканирование по пространству с использованием одиночных многокомпонентных векторно-фазовых (векторно-скалярных) приемников исследовалось в [1, 2, 6, 7, 10, 11].

На рис. 7 и 8 представлены для антенны МА-1 экспериментальные и теоретические зависимости ХН от угла компенсации, полученные в широкой полосе частот (1.3–1.7 кГц). Видно, что СА при всех направлениях имеет зеркальные лепестки, а в режиме антенны “бегущей волны” ($\alpha = 180^\circ$) имеет большой ореол, в том числе в зоне

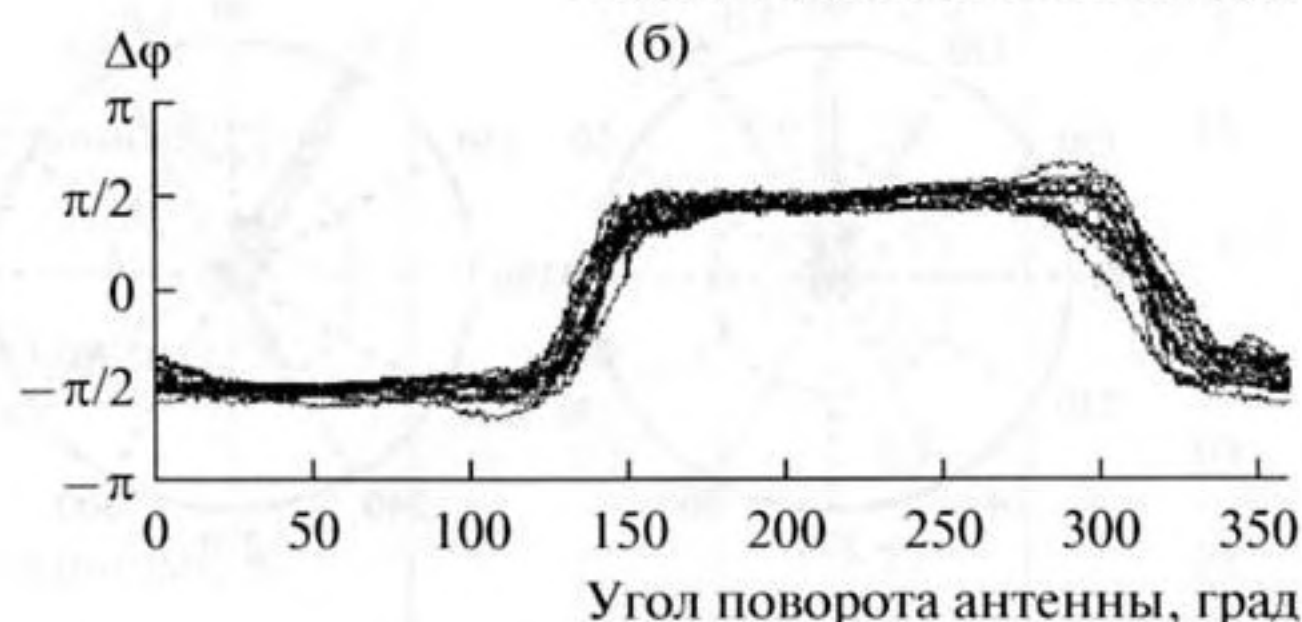
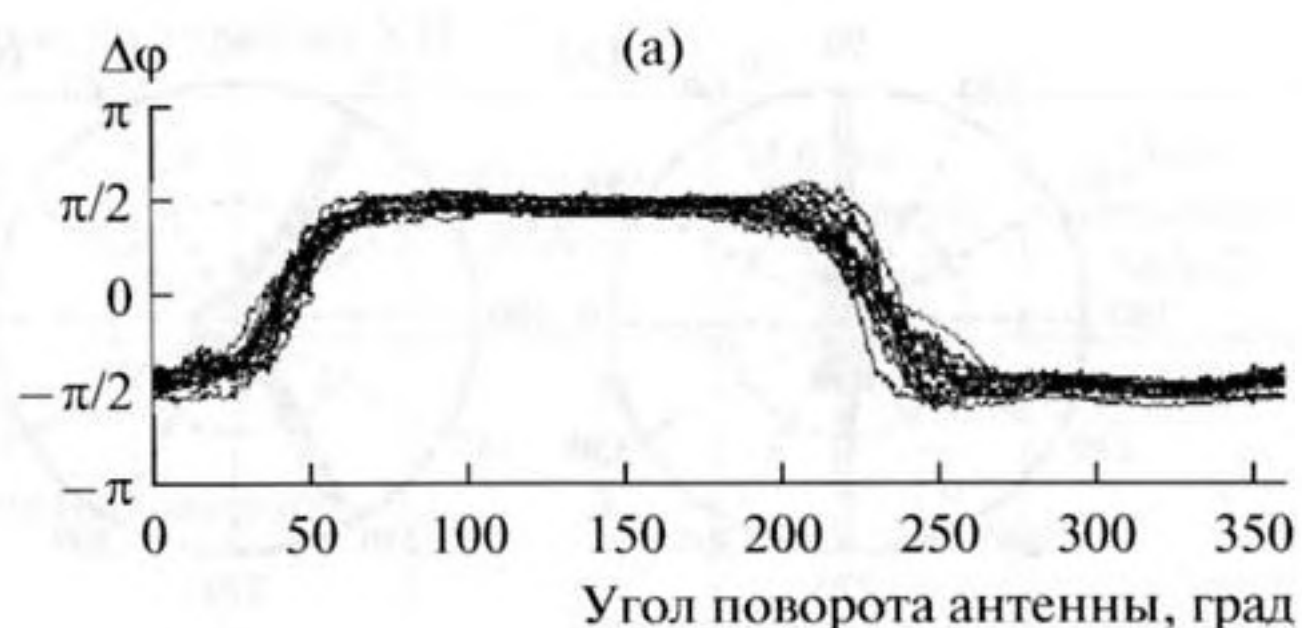


Рис. 6. Зависимости разности фаз $\Delta\phi$ между величинами компонент градиента звукового давления и давлением для 21 ВСМ, входящих в состав МА-1: (а) X-компонента, (б) Y-компонента.

$\alpha = 0^\circ$. При углах падения, близких к нормальным, ВСА на 20 дБ и более подавляет сигналы, приходящие по зеркальному лепестку. Но при скользящих углах из-за углового расширения ХН кардиоиды каждого ВСМ имеется небольшой зеркальный лепесток.

Аналогичные результаты получены и для макета МА-2. Некоторые данные приведены в табл. 1, где сопоставляются основные параметры ХН, вычисленные путем моделирования для разных углов компенсации антенны МА-1, и экспериментальных ХН для двух антенн — МА-1 и МА-2. Анализ рис. 7, 8 и табл. 1 позволяет сделать вывод о хорошем согласии рассчитанных и экспериментальных параметров ХН. Подтверждаются выводы [6, 10, 11] о подавлении зеркального лепестка и существенно меньшем уровне бокового поля. Расчеты показали, что при большом отношении сигнал/помеха параметры отклика ХН от мультипликативной комбинированной антенны практически совпадают с параметрами ХН для ВСА (рис. 8), поэтому они не приводятся.

СРАВНЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ПРИЕМА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫМИ И КОМБИНИРОВАННЫМИ АНТЕННАМИ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

На рис. 9, 10 приведены экспериментальные зависимости откликов, в том числе бокового поля от угла для антенн, сфазированных вдоль и перпен-

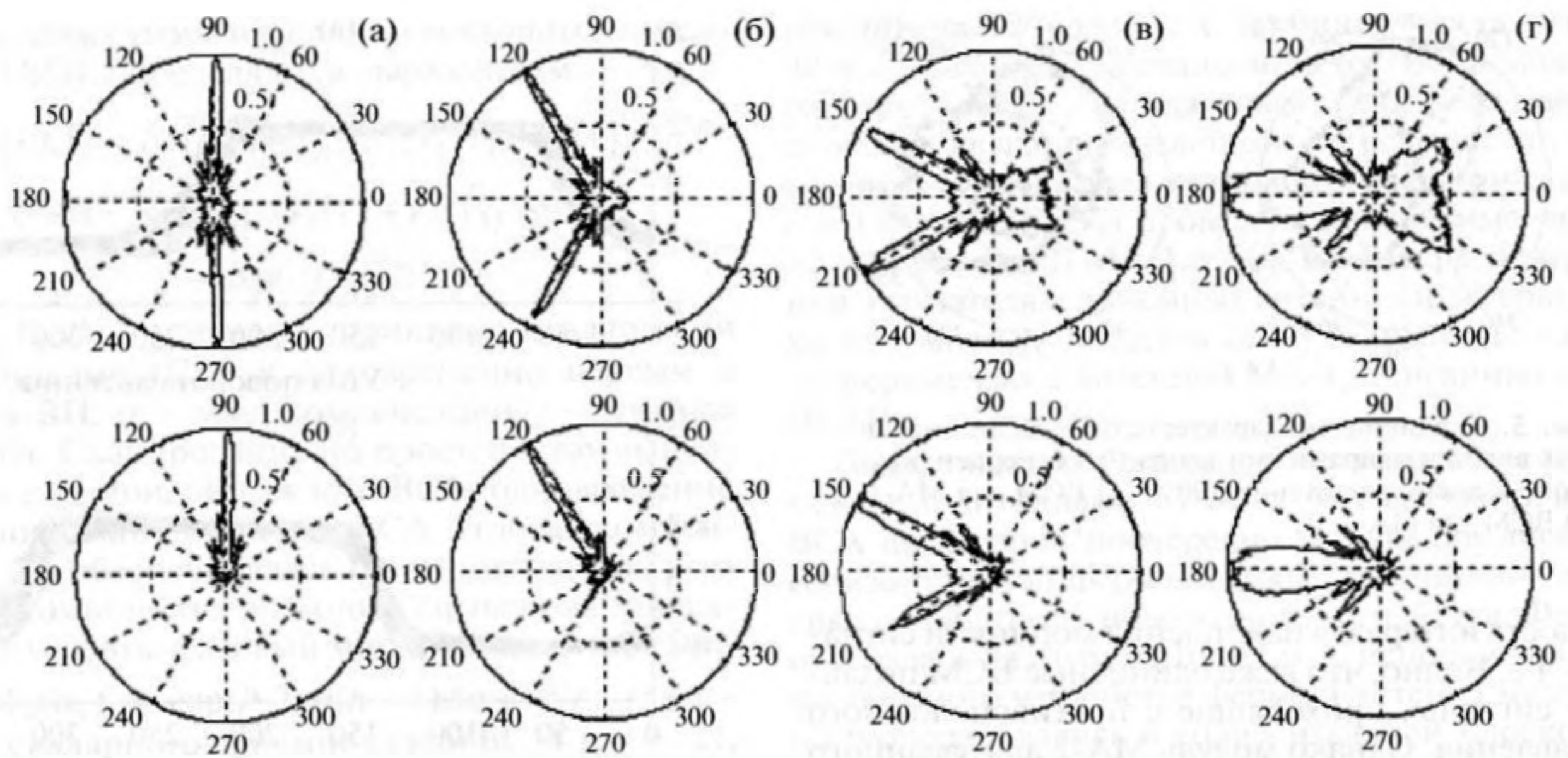


Рис. 7. Экспериментальные характеристики направленности скалярной (вверху) и векторно-скалярной (внизу) антенн с углами компенсации: (а) $\alpha = 90^\circ$, (б) $\alpha = 120^\circ$, (в) $\alpha = 150^\circ$, (г) $\alpha = 180^\circ$.

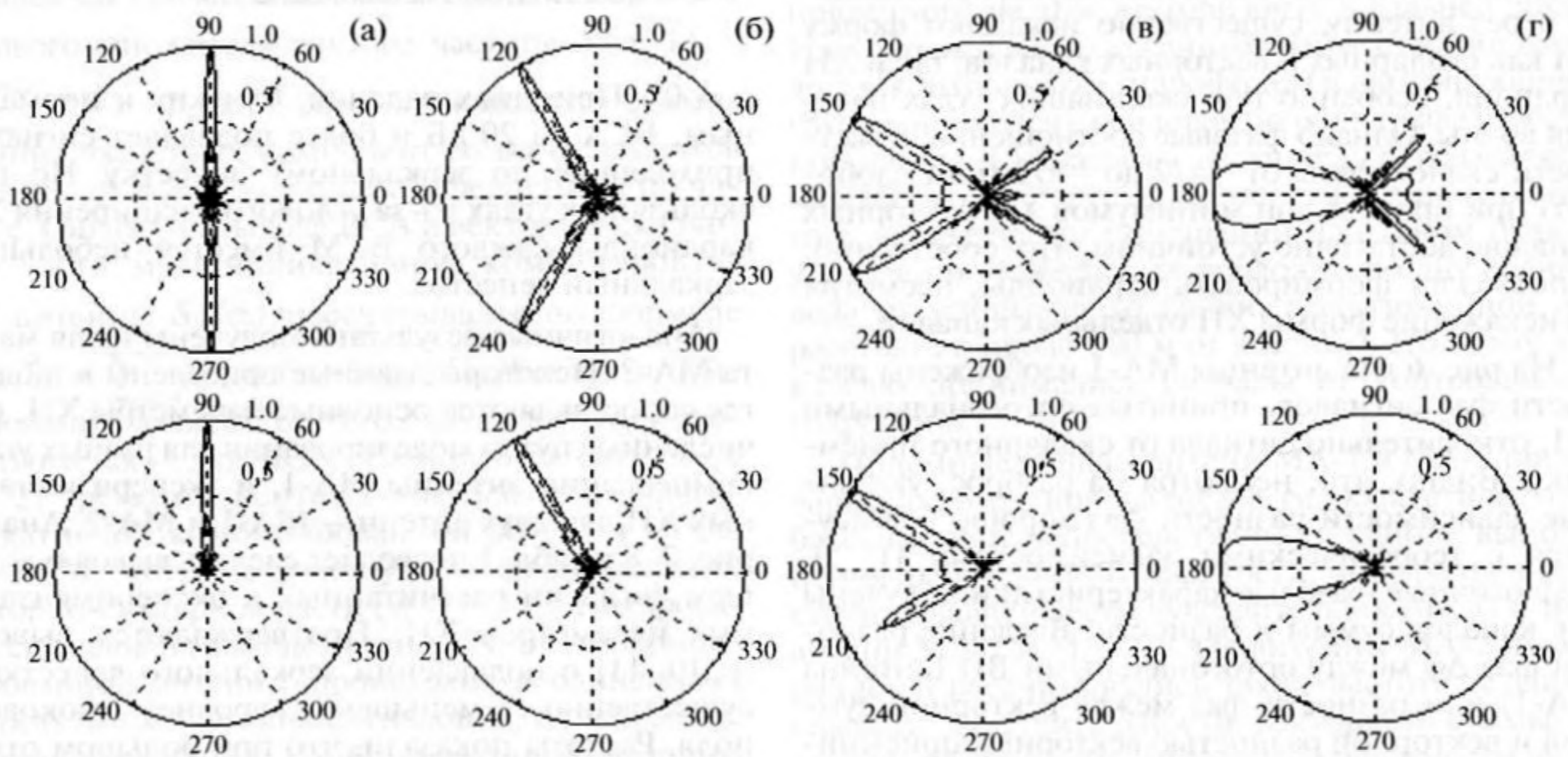


Рис. 8. Рассчитанные характеристики направленности скалярной (вверху) и векторно-скалярной (внизу) антенн с углами компенсации: (а) $\alpha = 90^\circ$, (б) $\alpha = 120^\circ$, (в) $\alpha = 150^\circ$, (г) $\alpha = 180^\circ$.

дикулярно к апертуре антенн трех типов — СА, ВСА и комбинированной антенны при мультипликативной обработке. Для других направлений получены качественно близкие результаты, согласующиеся с рис. 7, 8. Анализ боковых полей ХН векторно-скалярной и мультипликативной комбинированной антенн показывает значительное снижение зеркального лепестка по сравнению с ХН СА. В направлении, перпендикулярном к антенне, уменьшение составляет 20 дБ и более

(рис. 9б, 10б). Видно также, что по сравнению с СА на выходе ВСА и комбинированной антенны по всем направлениям происходит заметное уменьшение бокового поля (ореола). Но ВСА подавляет зеркальные лепестки эффективнее, чем мультипликативная комбинированная антенна. Компьютерное моделирование дает примерно такие же зависимости для всех типов антенн (рис. 8).

Можно также видеть, что на рис. 9а и 9б боковые максимумы вблизи основного максимума ХН

Основные параметры рассчитанной теоретически и экспериментальных ХН

Угол компенсации, градусы		Параметры ХН	Теория	Экс-	Экс-
			МА-1	перимент	перимент
			МА-1	МА-1	МА-2
0		Ширина главного лепестка, град	5	5	5
		Отношение минимального уровня к величине главного лепестка, %	4	4	5
30		Ширина главного лепестка, град	5.5	5.5	5
		Отношение дополнительного лепестка к главному, %	25	28	25
45		Ширина главного лепестка, град	7	7	7.5
		Отношение дополнительного лепестка к главному, %	50	52	54
60		Ширина главного лепестка, град	10	10	10
		Отношение дополнительного лепестка к главному, %	75	77	79
90		Ширина главного лепестка, град	34	26	35
		Потери величины главного лепестка по сравнению с величиной главного лепестка при угле компенсации 0° , %	21	32	10

для антенны МА-1 имеют завышенные по сравнению с ХН для МА-2 величины (рис. 10а и 10б). Причина в том, что из-за длительной эксплуатации в антенне МА-1 вышли из строя скалярный и один векторный приемники в модуле № 16. Другими словами, в решетке образовалась “дырка”, что приводит к росту боковых максимумов. В этом легко убедиться расчетным путем.

Из сравнения рис. 9 и 10 видно, что ухудшение характеристик одиночных кардиоид (рис. 5) для МА-2 в одном и том же рабочем диапазоне частот (завышенном для МА-2 и оптимальном для

МА-1) немного уменьшает эффект подавления уровня зеркального лепестка ХН для антенны МА-2 в целом. Но оно остается значительным, как и уменьшение бокового поля. Можно также отметить, что для СА на рис. 9а и 10а, как и на рис. 7 и 8, при формировании антенны “бегущей волны” в рабочей полосе частот 1300–1700 Гц наблюдается увеличение ореола в тыльной части. Причина в том, что при скорости звука в воде $c = 1437$ м/с и межэлементном расстоянии $d = 0.5$ м на частотах, превышающих $f = 1437$ Гц,

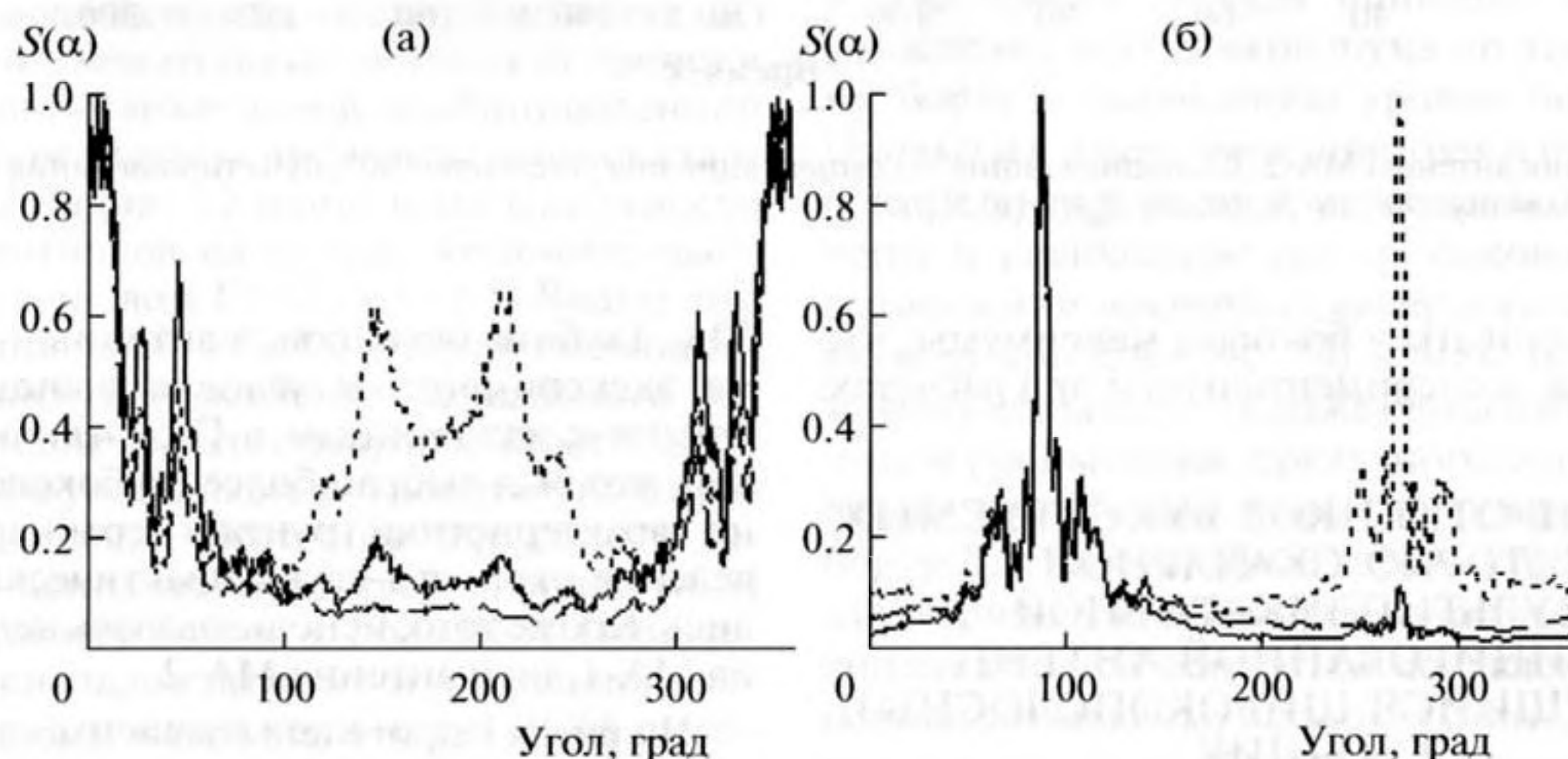


Рис. 9. Характеристики направленности для МА-1. Обозначено: $S_m(\alpha)$ – сплошная линия, $S_s(\alpha)$ – пунктирная линия, $S_{vs}(\alpha)$ – штриховая линия; (а) компенсация вдоль антенны 0° , (б) компенсация под углом 90° .

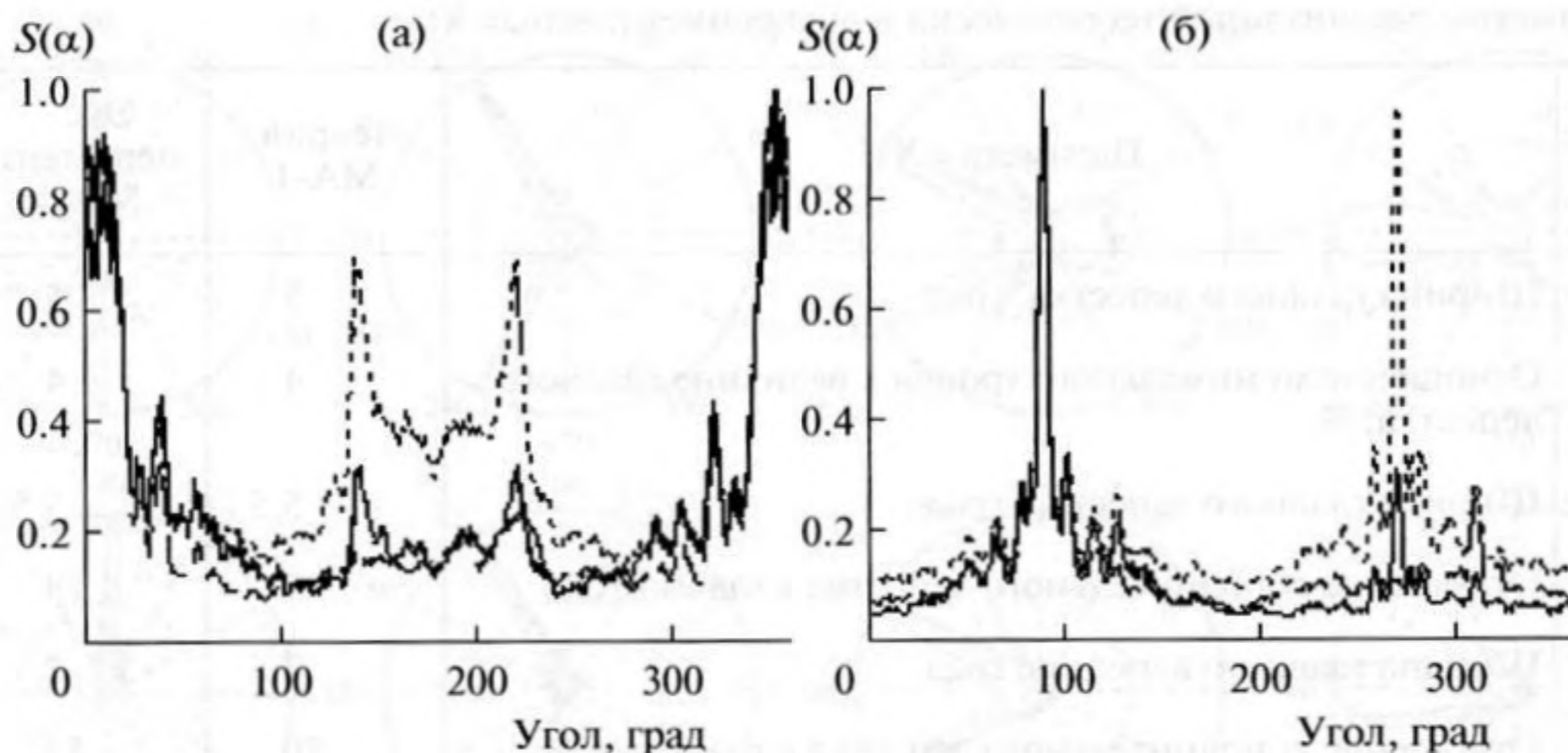


Рис. 10. ХН для МА-2. Обозначено: $S_m(\alpha)$ – сплошная линия, $S_s(\alpha)$ – пунктирная линия, $S_{vs}(\alpha)$ – штриховая линия; (а) компенсация под углом $\alpha = 0^\circ$, (б) компенсация под углом $\alpha = 90^\circ$.

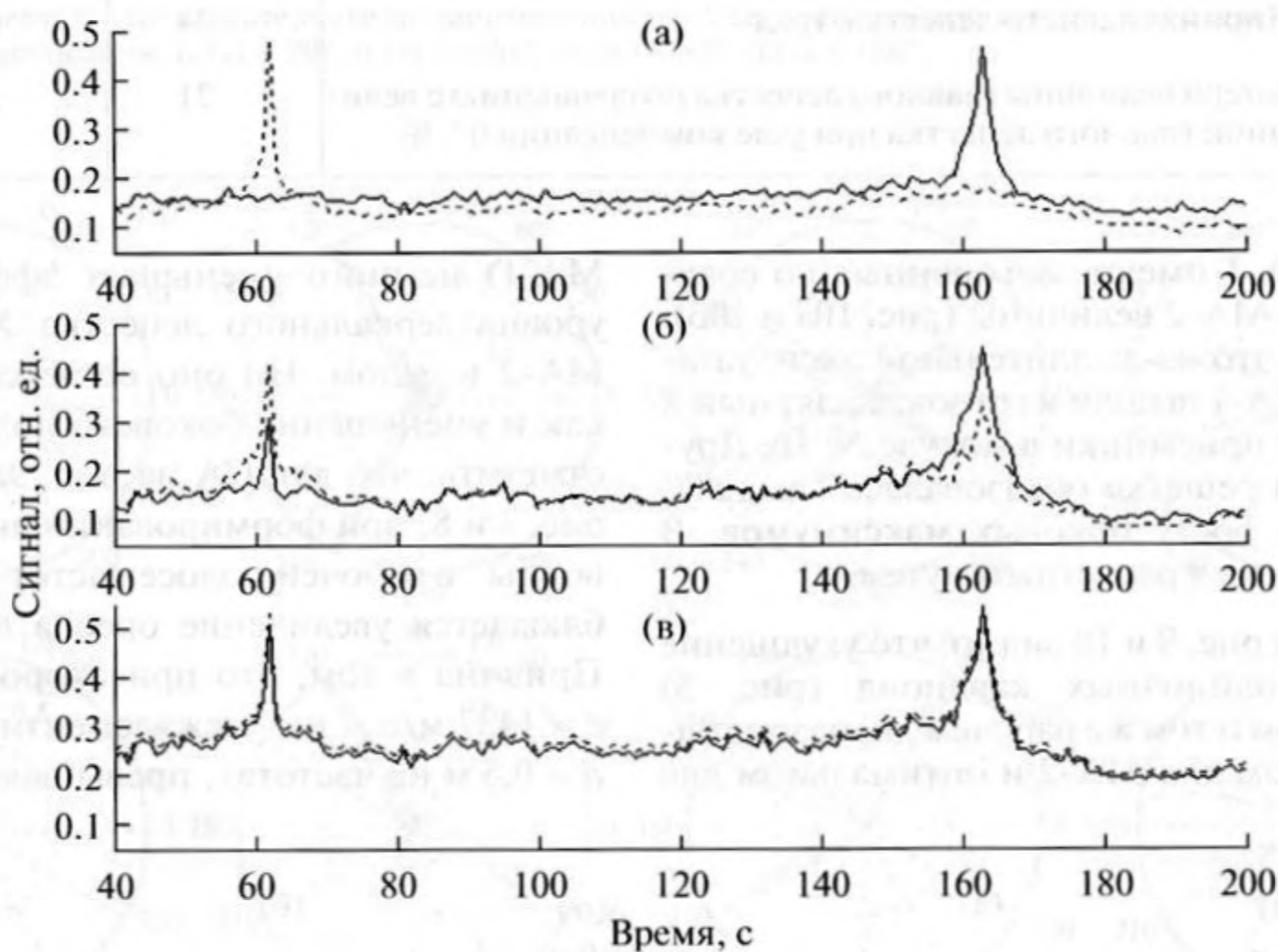


Рис. 11. Отклик антенны МА-2. Сплошная линия – компенсация под углом плюс 90° ; пунктирная линия – компенсация под углом минус 90° ; (а) $S_{vs}(t)$, (б) $S_m(t)$, (в) $S_s(t)$.

должны увеличиваться боковые максимумы, что и наблюдается экспериментально и при расчетах.

СРАВНЕНИЕ ОТКЛИКОВ БУКСИРУЕМЫХ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОЙ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ АНТЕНН НА ДВИЖУЩИЙСЯ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИСТОЧНИК

Эксперименты проводились в условиях пресноводного озера в волноводе с глубиной около

30 м. Глубина буксировки антенны – 8–10 м. Схема эксперимента и условия выполнения работ близки к изложенным в [7]. Отличие состояло в том, что был выбран более глубоководный район, но характеристики грунта и вертикальное распределение скорости звука практически не изменялись. Кроме того, использовалась не только антенна МА-1, но и антенна МА-2.

На рис. 11 приведены зависимости от времени сигналов на выходе трех типов антенн, полученные при буксировке антенн на прямолинейном галсе. В качестве источника широкополосного шу-

ма использовался катер, который “догонял” (справа) носитель с буксируемой антенной, пересекал “по носу” трассу судна-буксировщика и уходил назад (слева) параллельным галсом. При обработке данных длина каждой реализации, по которой вычислялся отклик, составляла 1 с, разрешение по частоте 1 Гц. Рабочая полоса частот — около 500 Гц. Верхняя частота 1500 Гц.

Видно, что все антенны, кроме скалярной, уверенно разделяют сигналы, приходящие с левого или правого направлений, а уровень бокового поля для ВСА или мультипликативной комбинированной антенны почти вдвое ниже, чем уровень бокового поля для СА. При движении “по левому борту” (соответствует времени прохода сформированной ХН около 160 с) происходит уширение основного максимума ХН. Одна из причин его уширения — катер движется в зоне Френеля на расстоянии меньше чем 200 м, а обработка производится как в дальней зоне, т.е. полагая фронт волны плоским. Вторая возможная причина уширения основного максимума ХН — близость берега и, соответственно, с “левого” направления принимался не только приемный сигнал, но и отраженная от берегов реверберационная помеха.

Следует отметить, что для выявления эффекта однонаправленности приема сигналов с использованием комбинированной антенны или ВСА шумовой источник — катер — перемещался параллельно антенне на сравнительно небольшом расстоянии. Как следствие, в момент прохода траверзного расстояния его сигнал на выходе сформированной ХН антенны существенно превышал величину помех, включая основную помеху — шум носителя (буксировщика).

На рис. 11 мультипликативная обработка сигналов происходила от СА с 21 скалярным приемником и одного трехэлементного векторно-скалярного модуля (один СП и два ортогональных ВП). Для оценки влияния количества ВСМ на эффективность подавления зеркального лепестка получены зависимости отклика антенны от времени на выходе мультипликативной комбинированной антенны при увеличении числа векторно-скалярных модулей. На рис. 12 приведены зависимости от времени сигналов на выходе комбинированной антенны с числом ВСМ от 1 до 5. Видно, что при увеличении числа ВСМ не только повышается эффективность подавления зеркального лепестка и улучшается однонаправленность, но и более чем вдвое уменьшается относительный уровень бокового поля. Величина зеркальных лепестков при использовании трех и более ВСМ сравнима с уровнем бокового поля ВСА. Отношение уровней сигналов прямого и зеркального лепестков при увеличении количества ВСМ от одного до пяти возрастает от 1.4 до 3.0, что обеспечивает однонаправленность приема сигналов и повышение помехоустойчивости обнаружения.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО МОДУЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО НОСИТЕЛЯ — ИСТОЧНИКА ПОМЕХ

Рассмотрим результаты экспериментального исследования откликов ВСА и комбинированной антенны при различных координатах расположения ВСМ. Обработка сигналов от макета антенны МА-1 проведена в двух вариантах. В первом варианте (рис. 13) все ВСМ расположены в начале скалярной антенны, т.е. ближе к носителю. Во втором случае (рис. 14) все ВСМ расположены в конце СА, т.е. дальше от носителя — основного источника помех.

Катер — источник сигнала, совершал движение по прежней схеме, многократно перемещался относительно движущегося прямолинейно носителя с буксируемой антенной МА-1. При проходе траверзных направлений, ортогональных к апертуре антенны ($\pm 90^\circ$), на выходе заранее сформированных в этих направлениях ХН образуются максимумы. Следует отметить, что для рис. 13–15 скорость перемещения катера — источника шума — относительно приемной антенны превышает в 2–2.5 раза скорость относительно перемещения, соответствующую рис. 11 и 12.

Из рис. 13, 14 следует, что при движении источника шума в дальней зоне оба отклика антенн, регистрируемых по левому или правому борту, достаточно симметричны. Различие величин траверзного расстояния (при разных проходах источника) и, соответственно, различие амплитуд сигналов на входе каждого СП и ВП, приводит к естественной вариации величины откликов антенн, зарегистрированных в различные моменты времени. Из сравнения рис. 13 и 14 следует, что увеличение помех от носителя на каналах векторно-скалярного модуля приводит к ухудшению разделения источников шума по левому и правому борту и увеличению уровня бокового поля. Однако и в этом случае при трех и более ВСМ наблюдается улучшение однозначной оценки пеленга и уменьшение уровня бокового поля. При размещении векторно-скалярного модуля в конце апертуры СА (рис. 14) помеха от носителя заметно уменьшается и даже одного ВСМ достаточно для уменьшения зеркального лепестка и разделения источников шума по левому и правому борту. Для антенн МА-1 и МА-2 при использовании варианта комбинированной антенны и мультипликативной обработки подавление величины основного максимума зеркального лепестка превышает 10–15 дБ. Для ВСА в среднем ослабление сигналов, пришедших по зеркальному лепестку, превышает 16–20 дБ.

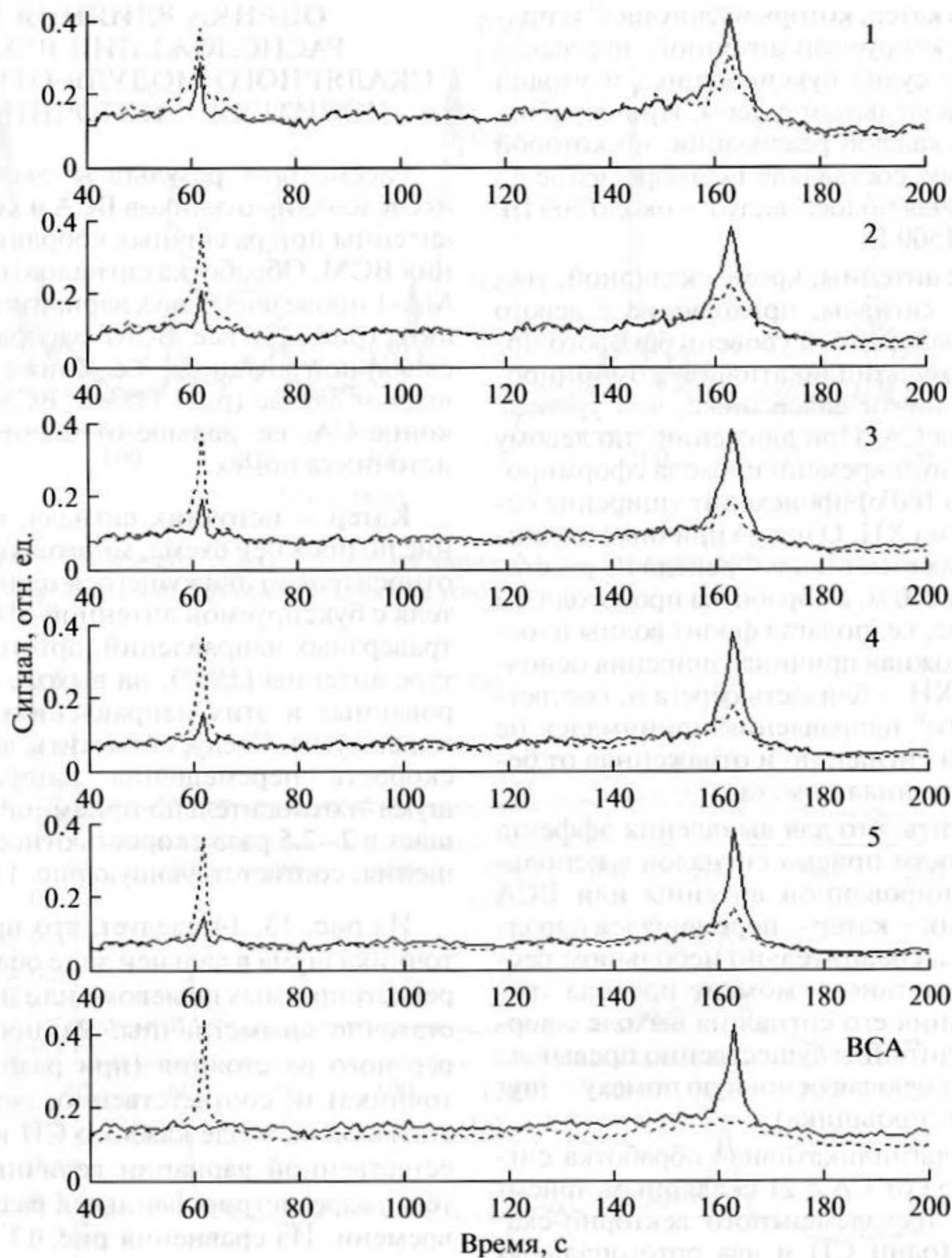


Рис. 12. Отклик антенны МА-2. Сплошная линия — компенсация под углом плюс 90° ; пунктирная линия — компенсация под углом минус 90° . Цифра на графиках обозначает число ВСМ (от 1 до 5). На нижнем графике приведен отклик ВСА.

Аналогичные результаты получены при буксировке и приеме сигналов антенной МА-2 (рис. 15). Схема эксперимента была аналогична схеме, используемой при работе с антенной МА-1. И для антенны МА-2 при вариантах обработки сигналов от векторно-скалярной и комбинированной антенн наблюдается уверенное разделение сигналов, приходящих справа и слева. Одновременно уменьшается уровень бокового поля. Отметим, что на рис. 15 приведены результаты, при получении которых для комбинированной антенны использовался один — последний — ВСМ, наиболее удаленный от носителя.

ВЫВОДЫ

Из полученных в стационарных условиях и в режиме буксировки экспериментальных данных следует, что векторно-скалярные антенны обеспечивают однонаправленность приема и эффективное подавление бокового поля по сравнению с откликом СА.

Комбинированная антенна, составленная из скалярной антенны и векторно-скалярных модулей и названная так по аналогии с комбинированным приемником [8], при мультипликативной обработке сигналов, как и ВСА, также подавляет зеркальный лепесток ХН, что позволяет разделять

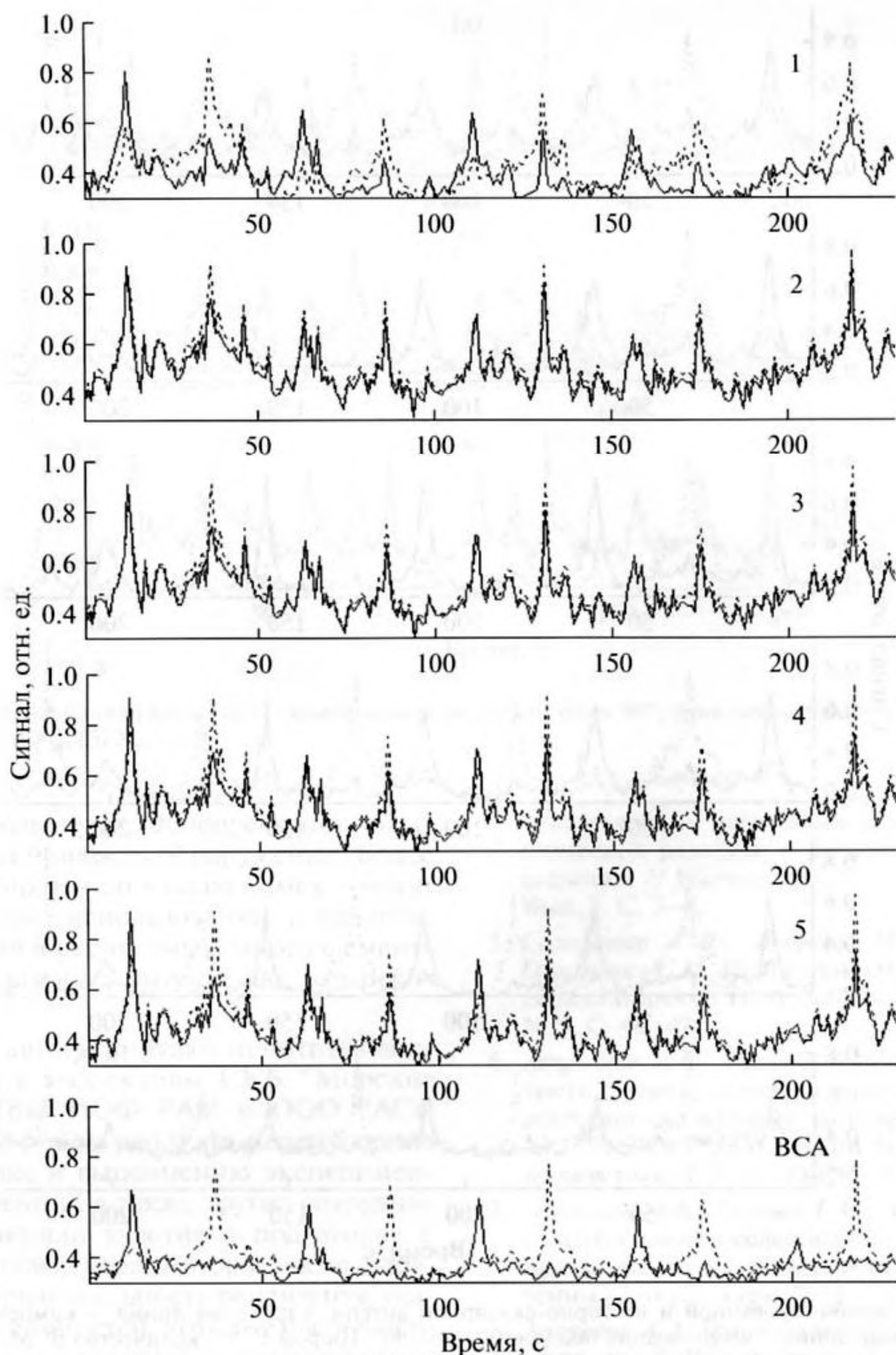


Рис. 13. Отклики комбинированной и векторно-скалярной антенн. Антенна МА-1. Сплошная линия – компенсация под углом плюс 90° ; пунктирная линия – компенсация под углом минус 90° . Цифры 1–5 – количество ВСМ. Все ВСМ расположены ближе к носителю. На последнем графике приведены отклики от ВСА.

сигналы, приходящие на антенну с двух направлений. Это обеспечивает раздельное обнаружение сигналов, приходящих “слева” и “справа”. Одновременно комбинированная антенна по сравнению с СА уменьшает при мультипликативной обработке уровень бокового поля, что приводит к подавлению помех. Но помехоустойчивость одного или нескольких ВСМ меньше, чем помехоустойчивость многоэлементной протяженной скалярной антенны. Как следствие, характери-

стики отклика антенны зависят от числа ВСМ и места размещения ВСМ относительно СА. При уменьшении помех (удалении ВСМ от носителя) величина подавления зеркального лепестка с использованием комбинированной антенны возрастает. Одновременно более чем вдвое уменьшается боковое поле. По этой причине векторно-скалярные модули следует устанавливать в “хвосте” буксируемых антенн – вдали от источника помех (носителя антенны). Эффективность по-

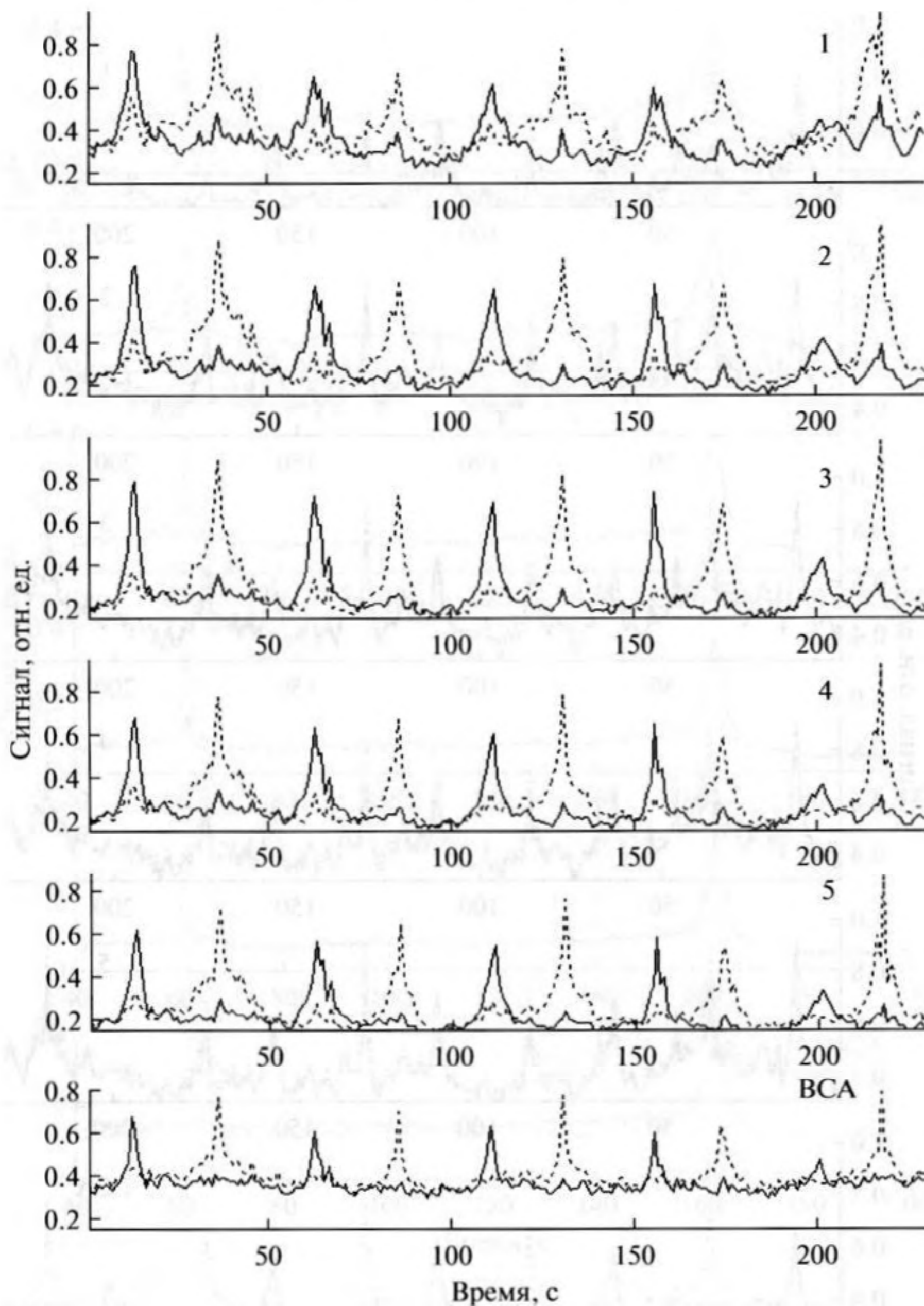


Рис. 14. Отклики комбинированной и векторно-скалярной антенн. Сплошная линия — компенсация под углом плюс 90° ; пунктирная линия — компенсация под углом минус 90° . Цифры 1–5 — количество ВСМ, удаленных от носителя. На графике внизу приведен отклик от ВСА. Используется МА-1.

давления зеркального лепестка для комбинированной антенны возрастает при увеличении одновременно используемых ВСМ в векторно-скалярной части антенны. Одновременно дополнительно уменьшается уровень бокового поля.

В нестационарных условиях при буксировке комбинированной антенны, осуществляющей мультипликативную обработку, величина подавления зеркального лепестка несколько уменьшается, если сравнивать со стационарными условиями, когда нет шумов носителя, шумов обтекания, а пеленг на источник постоянный. В результате при

использовании стационарных донных антенн, при длительном накоплении сигнала от удаленного источника возможно увеличение (накопление) отношения сигнал/помеха и более эффективное подавление сигнала, приходящего по зеркальному лепестку, — до 20 дБ.

Использование протяженных линейных скалярных антенн малого диаметра совместно с малогабаритными ВСМ может существенно улучшить рабочие характеристики пеленгования и обнаружения сигналов стационарными или буксируемыми антеннами, в частности — обеспечить однозначность оценки направления и оценки ко-

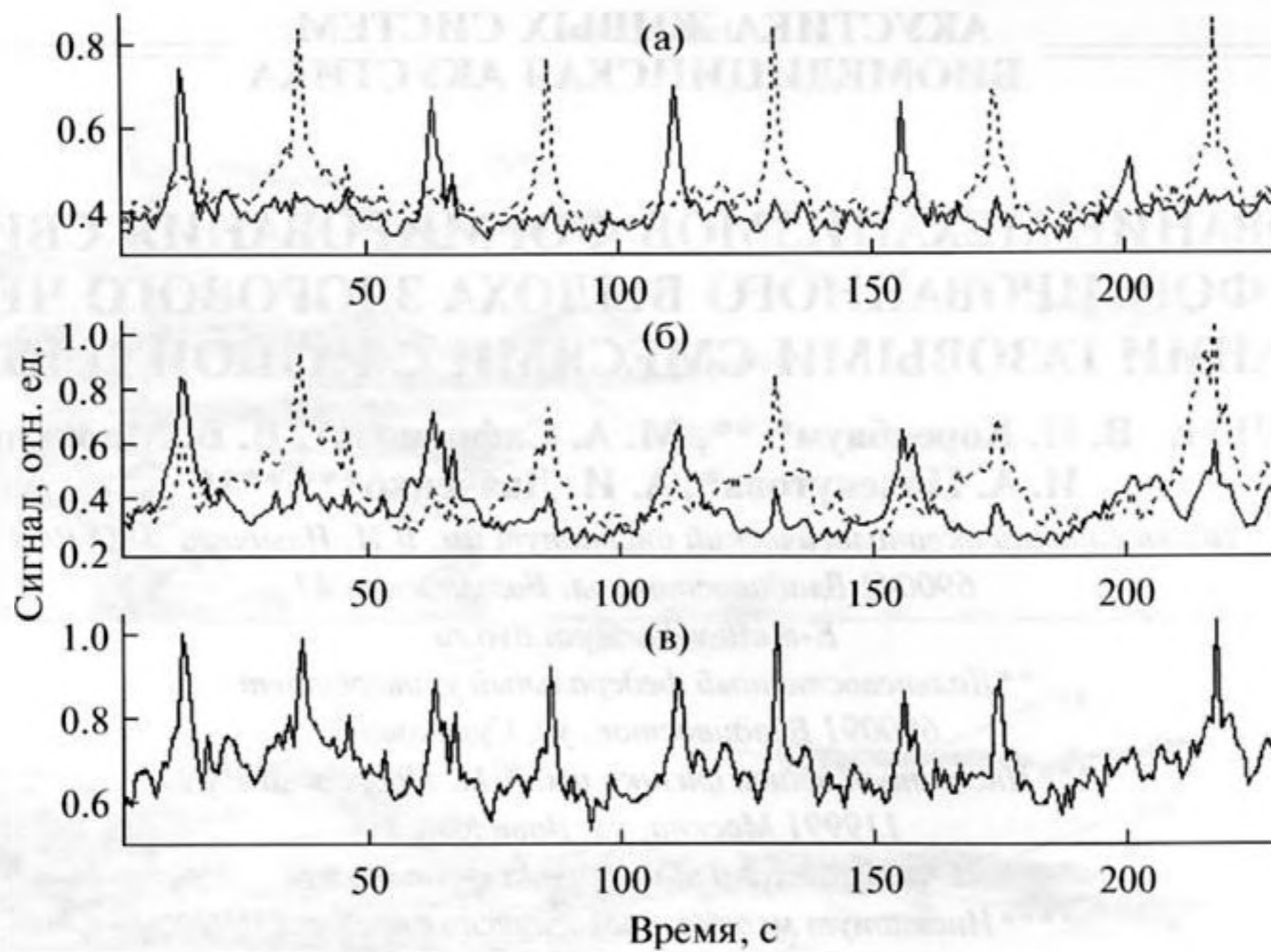


Рис. 15. Отклик МА-2. Сплошная линия — компенсация под углом плюс 90° ; пунктирная линия — компенсация под углом минус 90° ; (а) S_{vs} , (б) S_m , (в) S_s .

ординат источников шума. Одновременно повышается помехоустойчивость обнаружения. Более устойчивые по отношению к полю помех — могут быть получены при использовании в качестве стационарных или буксируемых многоэлементных векторно-скалярных антенн, как это рекомендуется в [7].

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить коллективы СКБ “Морские технологии” НЦВИ ИОФ РАН и ООО “АСК Про” за большой объем работ по изготовлению антенн, подготовке и выполнению экспериментальных исследований, а также других сотрудников, которые приняли участие в подготовке и проведении экспериментов. Авторы также выражают глубокую признательность рецензенту, указавшему на ряд неточностей, которые были в первом варианте статьи и которые, как нам кажется, исправлены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 223 с.
3. Гордиенко В.А., Илюшин Я.А. О флуктуациях угла пеленга сосредоточенного источника, определяемого векторным приемником в поле шумов океана // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 365–370.
4. Андреев М.Я., Ключин В.В., Охрименко С.Н. Гидроакустические станции с гибкими протяженными буксируемыми антеннами для ведения гидроакустической разведки и освещения подводной обстановки // Научн.-техн. сб. Гидроакустика. 2006. Вып. 6. С. 3–8.
5. Симоненко С.В., Андреев М.Я., Ключин В.В., Охрименко С.Н. Новое поколение гидроакустических станций с ГПБА для НК // Морской сб. 2005. № 9. С. 45–47.
6. Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Точность оценки параметров локального источника векторно-скалярными антеннами // Сб. трудов XXII сессии РАО и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 332–335.
7. Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Экспериментальное исследование характеристик направленности линейной векторно-скалярной антенны // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 5. С. 681–694.
8. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. М.: Наука, 1973. 400 с.
9. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
10. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Расчет характеристик направленности векторно-скалярных протяженных антенн по результатам измерений в ближней зоне с использованием импульсных частотно-модулированных сигналов // Сб. трудов XX сессии РАО и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 444–448.
11. Белова Н.И., Кузнецов Г.Н. и др. О возможности однонаправленного пеленгования широкополосных сигналов с использованием линейных векторно-скалярных антенн // Сб. трудов XX сессии РАО и Сессии Научного совета РАН по акустике. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 300–304.