



УДК 621.396.96

© *В. С. Колмогоров, Р. В. Викторов, А. В. Омельченко,
Д. Г. Кречетов, 2011*

МЕТОД ПОИСКА АПЕРТУРНОЙ ФУНКЦИИ В МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Колмогоров В. С. – д-р техн. наук, доц., ст. преп. кафедры «Гидроакустика»; *Викторов Р. В.* – адъюнкт кафедры «Гидроакустика»; *Омельченко В. В.* – канд. техн. наук, нач. кафедры «Гидроакустика» (ТОВМИ ВУНЦ ВМФ ВМА); *Кречетов Д. Г.* – нач. отдела (в/ч 90720)

Рассматривается метод поиска амплитудно-фазового распределения сигнала по апертуре гидроакустической приемной многоэлементной антенны с использованием гетеродинной обработки гидроакустического сигнала.

The search method of amplitude-phase distribution of a signal over the aperture of hydroacoustic multi-element antenna using heterodyning processing of a signal is considered.

Ключевые слова: адаптация, кривизна фронта волны, слепой поиск.

Введение

Гидроакустическую систему, работающую в реальном морском волноводе по обнаружению морских объектов со специфичными случайными полями морской среды и характеристиками морских объектов и их изменчивости, можно отнести к сложной системе, которая характеризуется:

- отсутствием необходимого математического аппарата описания процесса формирования модели сигнала от морского объекта;
- непредсказуемостью системы из-за наличия множества случайных факторов, влияющих на формирование модели процесса.

Специфичность гидроакустической информации при сближении с морскими целями заключается в том, что существующие гидроакустические средства предназначены в основном для обнаружения целей в дальней зоне. База гидроакустических антенн в этих средствах сформирована для приема плоского фронта волны. Сигнал же от морской цели, находящейся в морском волноводе, за счет рефракционных и интерференционных явлений формирует неплоский фронт волны (с определенной степенью кривизны), что приводит к несфазированному приему сигнала по апертуре приемной антенны.



Теоретический анализ

Из теории оптимальной фильтрации известно, что все компоненты спектра входного сигнала должны суммироваться с нулевой начальной фазой.

В общем виде спектр пространственно-временного сигнала [1] можно представить как:

$$\begin{aligned} S(\omega_t, \omega_\rho) &= S(\omega_t)S(\omega_\rho) = \iint S(t, \rho) \exp\{j\omega_t t + \omega_\rho \rho\} dt d\rho = \\ &= aR \iint \frac{I_\rho}{r_\rho} U\left[t - \frac{R + r(\rho)}{c}\right] \exp\left\{j\omega_{t0}\left[t - \frac{R + r(\rho)}{c}\right]\right\} \exp\{-j(\omega_t + \omega_\rho)\} dt d\rho, \end{aligned}$$

где: $I(\rho)$ – апертурная функция приемной антенны; ρ – радиус-вектор точки x, y, z на плоскости антенны; $S(\omega_t)$ – спектр временной частоты; $S(\omega_\rho)$ – спектр пространственных частот; c – скорость звука; R – расстояние между точкой наблюдения и антенной.

Апертурная функция приемной антенны определяется амплитудно-фазовым распределением чувствительности по апертуре антенны. Пространственные частоты $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ характеризуют скорость изменения полной фазы гармонического сигнала при изменении соответствующей координаты x, y, z , и в этом отношении понятие пространственной частоты сходно с понятием временной частоты.

Для оптимального пространственного фильтра необходимо нахождение спектра $S^*(\omega_t, \omega_\rho)$ сопряженного с сигналом $S(\omega_t, \omega_\rho)$. Из выражения видно, что для этого необходимо найти модуль $S^*(\omega_t, \omega_\rho)$, определяемый апертурной функцией $I(\rho)$. Поэтому для оптимизации пространственного фильтра необходимо согласовать АЧХ и ФЧХ пространственного фильтра с АЧХ и ФЧХ принимаемого сигнала. Т.е. согласовать параметры сигнала и параметры апертурной функции антенны.

Одной из проблем, которую необходимо решать при сближении с целью, является необходимость постоянного согласования кривизны фронта волны и апертурной функции. Сложность задачи заключается в том, что кривизна фронта волны очень динамично изменяется во времени. Эта задача может быть решена путем создания адаптивной системы, которая могла бы оптимизировать антенну по фазированному приему сигнала с неплоским фронтом волны. При этом необходим такой алгоритм адаптации, который имел бы большую скорость сходимости при высокой надежности правильного принятия решения. Известен ряд методов многопараметрической оптимизации и адаптации сложных систем, которые, по сути, сводятся к поиску оптимального решения.

Эти методы можно подразделить на три основных группы при их интерпретации и сочетании:



- 1) методы с регулярным поиском оптимального решения (градиентный поиск, наискорейшего спуска, Ньютона и т. д.);
- 2) методы случайного поиска;
- 3) методы слепого поиска или полного перебора всех возможных вариантов.

Следует отметить, что наиболее близкими по задаче компенсации кривизны фронта волны являются методы адаптивной оптики [2] с регулярным поиском оптимального решения, которые используют такие алгоритмы поиска, как апертурное зондирование и фазовое сопряжение. Но при решении задачи адаптации к кривизне фронта волны, при быстром сближении с морской целью в ближней зоне, эти методы не отвечают требованию по быстродействию.

Из вышеперечисленных методов поиска оптимального решения метод слепого поиска обеспечивает наиболее надежное нахождение правильного решения, но при этом имеет наибольшие временные затраты. Этот метод заключается

в последовательном переборе состояний из множества допустимых; при этом запоминается наибольшее значение функции качества и состояние, приведшее к этому наибольшему значению. Главное преимущество метода сканирования – это наивысшая надежность алгоритма из всех известных методов оптимизаторов [3], что позволяет при работе по методу сканирования всегда находить глобальный экстремум.

В шумопеленгаторных гидроакустических системах неэкономичность по временным затратам данного метода можно устранить путем использования предлагаемого гетеродинного метода обработки широкополосного гидроакустического сигнала.

Принцип гетеродинной обработки гидроакустического сигнала [4] в многоэлементных гидроакустических системах заключается в:

- преобразовании сигнала в частотной области (его гетеродинировании) в каждом канале;
- поканальном фазовом сдвиге сигнала во временной области за счет подачи его на частотно зависимые линии задержки;
- суммировании поканально прогетеродинированных сигналов.

Это позволяет оптимизировать характеристики пространственного фильтра за счет формирования необходимой апертурной функции антенны, согласованной с амплитудно-фазовым распределением принимаемого сигнала по апертуре антенны.

Методика оценки отклика многоэлементной антенны при гетеродинной обработке сигнала

Гетеродинная обработка с принципами, изложенными выше, в многоканальной антенне может привести к согласованной по фазовому фронту фильтрации пространственного сигнала. Для подтверждения этого было смоделировано формирование характеристики направленности цилиндрической мно-

гоэлементной антенны. Для производства расчетов использовались геометрические соотношения, показанные на рис. 1.

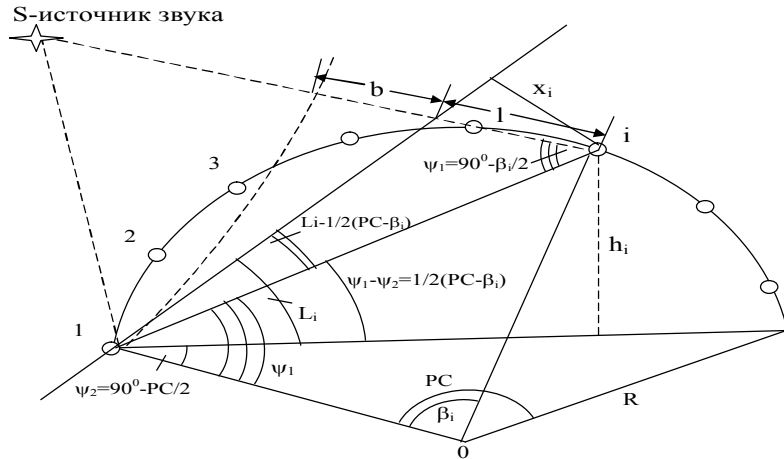


Рис. 1. Геометрические соотношения при вычислении отклика цилиндрической антенны (фронт волны не плоский)

Здесь под 1, 2, 3... i обозначены номера электроакустических преобразователей многоэлементной антенны.

Поскольку за счет гетеродинирования полезного сигнала в ВЧ-область происходит перемножение ВЧ и НЧ сигналов, отклик многоэлементной антенны будет определяться, как:

$$D(a) = \sum_{i=1}^N S_{НЧ_i}(t, a_i) S_{ВЧ_i}(t) \quad (1)$$

где: $S_{НЧ_i}(t, a_i) = a_{НЧ_i} e^{j[\omega(t-t_1-t_2)]}$ – уровень низкочастотного полезного сигнала; $S_{ВЧ_i}(t) = a_{ВЧ_i} e^{j[\omega(t-t_2)]}$ – уровень ВЧ сигнала гетеродина; N – количество приемников в рабочем секторе антенны; $t_1 = x_i/c$; $t_2 = h_i/c$ – временные задержки в водной среде и в линиях задержки соответственно. Здесь для плоского фронта волны $x_i = \rho_i \sin[\alpha - \frac{PC - \beta_i}{2}]$ – задержка прихода фронта НЧ волны i -го приемника относительно первого приемника; PC – величина рабочего сектора антенны в градусах; $h_i = \rho_i \sin \frac{PC - \beta_i}{2}$ – задержка сигнала за счет прохождения i -й линии задержки в компенсаторе ГАС; $\rho_i = 2r \sin \frac{\beta_i}{2}$ – расстояние от первого приемника в рабочем секторе (PC) до i -го приемника.



Расчеты в соответствии с выражением (1) и натурный эксперимент, описанный в работе [5] для плоского фронта волны показали, что при гетеродинировании сигнала происходит перефазировка антенны (перераспределение амплитудно-фазового распределения по антенне), что приводит к формированию различных ХН при различной частоте гетеродина.

Для неплоского фронта волны вместо расстояния x_i НЧ сигнал будет проходить расстояние $l+b$ (рис. 1), $l = \frac{x_i}{\cos \theta}$; $b = \frac{r - r \cos \theta}{\cos \theta}$, θ – направление на источник сигнала; $l+b = \frac{x_i + r(1 - \cos \theta)}{\cos \theta}$.

Тогда отклик антенны следует искать как:

$$D(\theta, r, \lambda_{\text{вч}}) = \sum_{i=1}^N \frac{A_{\text{нч}} \cdot A_{\text{вч}}}{2} \left\{ \begin{array}{l} \cos \left[(\omega - \Omega)t - 2\pi \frac{x_i r (1 - \cos \theta)}{\cos \theta \cdot \lambda_{\text{нч}}} - 2\pi h_i \left(\frac{\lambda_{\text{вч}} - \lambda_{\text{нч}}}{\lambda_{\text{вч}} - \lambda_{\text{нч}}} \right) \right] + \\ + \cos \left[(\omega + \Omega)t - 2\pi \frac{x_i r (1 - \cos \theta)}{\cos \theta \cdot \lambda_{\text{нч}}} - 2\pi h_i \left(\frac{\lambda_{\text{вч}} + \lambda_{\text{нч}}}{\lambda_{\text{вч}} \cdot \lambda_{\text{нч}}} \right) \right] \end{array} \right\} \quad (2)$$

Как видно из выражения (2), отклик антенны будет зависеть от расстояния до источника звука направления на него и частоты гетеродина (r, θ и $\lambda_{\text{вч}}$).

Результаты натуральных испытаний

Для оценки возможности формирования отклика приемной системы с многоканальной цилиндрической антенной за счет взаимодействия в тракте обработки были произведены измерения ХН специально изготовленного для этой цели макета (рис. 2) с многоэлементной цилиндрической антенной и возможностью модуляции НЧ сигнала в тракте обработки.

Макет представлял собой цилиндрическую антенну диаметром 0,27 м и высотой 0,27 м, состоящую из 60 электроакустических преобразователей, расположенных на 12 образующих по окружности антенны с шагом по углу 30° . Электроакустические преобразователи, расположенные на образующих, соединялись параллельно. Каждый из преобразователей представлял собой параллельное соединение пяти пьезокерамических приемников, расположенных один под другим.

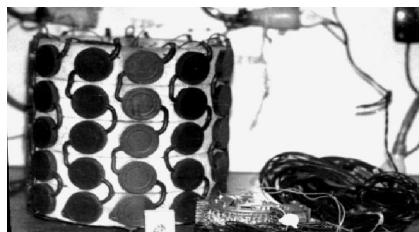


Рис. 2. Макет многоэлементной цилиндрической антенны

Структурная схема макета многоэлементной ГАС при экспериментальном исследовании отклика антенны с подачей ВЧ сигнала в тракт обработки показана на рис. 3. Взаимодействие НЧ и ВЧ сигналов в гетеродинном режиме происходило на специально изготовленных и включенных в схему обработки модуляторах.

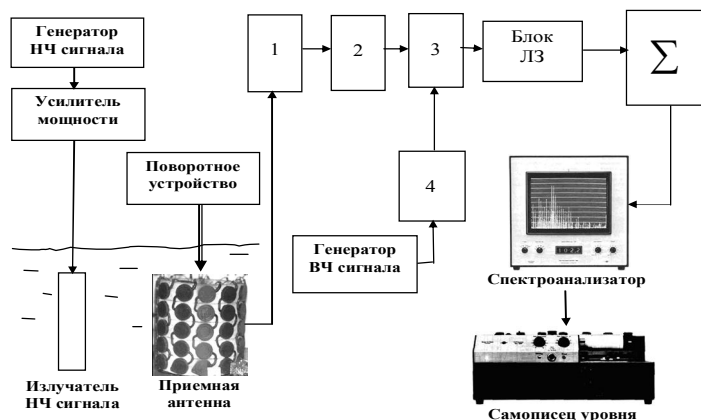


Рис. 3. Структурная схема макета многоэлементной ГАС при экспериментальном исследовании отклика антенны с подачей ВЧ сигнала в тракт обработки: 1 – коммутатор выбора каналов; 2 – пятиканальный усилитель; 3 – коммутатор выбора режима; 4 – пятиканальный модулятор; ЛЗ – линии задержек

Шаговым искателем производилось коммутирование групп из пяти преобразователей, при этом рабочий сектор антенны составлял 120° . Далее сигнал усиливался пятью предварительными усилителями и поступал на коммутационную схему, положение переключателей которой производило выбор режима работы макета: штатный или гетеродинный. Экспериментальные исследования с макетом проводились в летний период на опытовом судне на якорь, глубина места составляла 21 м, море – штиль, скорость ветра 5 м/с. Исследуемый макет был прикреплен к поворотному устройству посредством жесткого механического соединения. Поворотное устройство размещалось в центральной части кормовой оконечности опытового судна и вынесено на расстояние 1 м от кормового среза (на судне из-за конструктивных особенностей макет от корпуса в водной среде отстоял на 3 м).

Заглубление макета составляло 3 м. В качестве излучателя НЧ сигнала использовался излучатель 1-го диапазона комплекта КИП-10. Характеристика направленности макета антенны измерялась в тональном режиме работы. Расстояние между излучателем НЧ сигнала и макетом антенны выбиралось при условии формирования плоского фронта волны в соответствии с выра-



жением $r \geq 2L_a^2 / \lambda_{вч}$, где: L_a – максимальный размер антенны; $\lambda_{вч}$ – длина волны ВЧ сигнала.

Испытуемый макет поворачивался вокруг своей оси в горизонтальной плоскости. С генератора НЧ сигнала ГЗ – 110 на усилитель мощности подавался полезный сигнал частотой $F_{нч} = 3$ кГц или $F_{нч} = 6$ кГц, который принимался преобразователями антенны.

После этого сигнал с трех центральных из пяти преобразователей подавался на блок линий задержек, где производилось выравнивание цилиндрической базы макета для НЧ сигнала. Условие линейности приемно-усилительного тракта достигалось выбором величины входного сигнала при неизменном коэффициенте усиления предварительных усилителей. При переводе макета в гетеродинный режим работы перед блоком линий задержек осуществлялось подключение пятиканального модулятора и сигнала гетеродина, подаваемого в тракт обработки. Частота гетеродина составляла $F_{гет} = 9 \dots 16$ кГц. Измерение ХН в гетеродинном режиме работы производилось при $F_{нч} = 3$ кГц или $F_{нч} = 6$ кГц с неизменным уровнем сигнала гетеродина, при этом измерение ХН осуществлялось как на разностной, так и на суммарной частотах. На рис. 4 представлены характеристики направленности макета цилиндрической многоэлементной антенны в штатном (рис. 4а) и гетеродинном (рис. 4б, в) режимах работы.

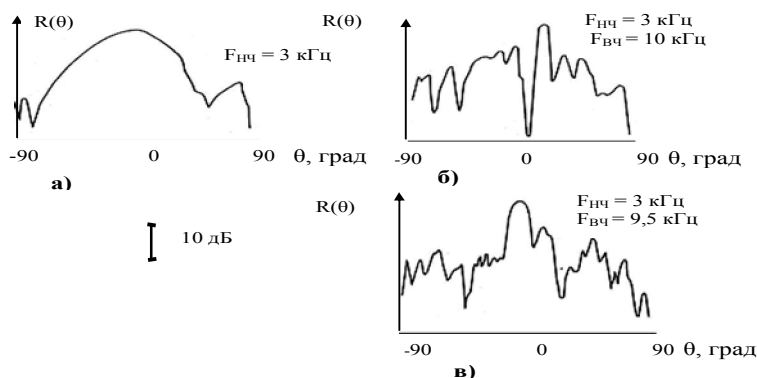


Рис. 4. Отклик макета цилиндрической антенны:
а – при работе в штатном режиме; б, в – в гетеродинном режиме

Как видно из рис. 4, при подаче ВЧ сигнала в тракт обработки при перемножении его с НЧ сигналом возможно получение ХН с более узким основным максимумом, чем в штатном режиме. Как показали исследования [5], возможно формирование и глубоких минимумов (рис. 4б), что может быть полезно при подавлении локальной помехи, но возможен и развал ХН на определенных частотах ВЧ сигнала с образованием бокового поля ХН большого уровня.

Экспериментальные исследования, произведенные с использованием макета многоэлементной цилиндрической антенны, подтвердили численные расчеты [6] и показали возможность формирования ХН необходимой формы при взаимодействии НЧ и ВЧ сигналов в тракте обработки.

Результаты моделирования гетеродинного сканирования широкополосного сигнала в пассивном режиме

Предлагаемый метод сканирования можно отнести к методу слепого поиска, т.е. методу перебора всех возможных вариантов подстройки под кривизну фронта волны базы антенны. При этом за счет широкополосности сигнала этот метод при ее высокой надежности имеет минимум временных затрат на поиск.

Принцип работы ГАС в гетеродинном режиме по обнаружению цели в ближней зоне предполагает использование генератора ВЧ сигнала либо в режиме ступенчато изменяющегося ВЧ сигнала, либо использование многочастотного ВЧ сигнала с целью транспонирования широкополосного НЧ сигнала от цели в ВЧ область.

Гетеродинирование НЧ сигнала в ВЧ область производится с целью подачи на частотно зависимые линии задержки (ЛЗ) одного и того же НЧ сигнала, прогетеродинированного в ВЧ область. Это позволяет одновременно формировать $F_c \times F_r$ баз антенны при одночастотном ВЧ сигнале и $F_c \times F_r \times N$ при N частотном ВЧ сигнале, что позволяет одновременно оценивать кривизну фронта волны с 10^3 – 10^6 и более вариантами, и тем самым многократно повышая производительность поиска, при этом производя самый надежный по определению слепой поиск путем перебора всех возможных вариантов. Полоса анализируемого сигнала зависит от ее информативности, что в свою очередь предполагает когерентность спектральных составляющих шумового сигнала от морского объекта. Поэтому одной из предшествующих поиску процедур следует считать процедуру выявления когерентности сигнала, включая кепстральный анализ сигнала.

Следует отметить, что выбор использования одного из двух методов: метода последовательного ступенчато подаваемого ВЧ сигнала и метода одновременной подачи многочастотного ВЧ сигнала гетеродина будет определяться наличием когерентных составляющих в спектре шумоизлучения цели. Так, если весь спектр шумоизлучения будет состоять из суммы когерентных составляющих, то для увеличения быстродействия следует использовать метод одновременной многочастотной ВЧ сигнала. Если сигнал от цели слабокогерентен по апертуре антенны, то следует использовать метод с излучением ступенчато подаваемого ВЧ сигнала.

С целью проверки возможности формирования ХН в ближней зоне источника шумоизлучения (зоне Френеля) было произведено имитационное моделирование с использованием программной среды C++. На рис. 5 показаны результаты имитационного моделирования многоэлементной цилиндрической антенны (рабочий сектор антенны показан на рисунках в виде дуги).

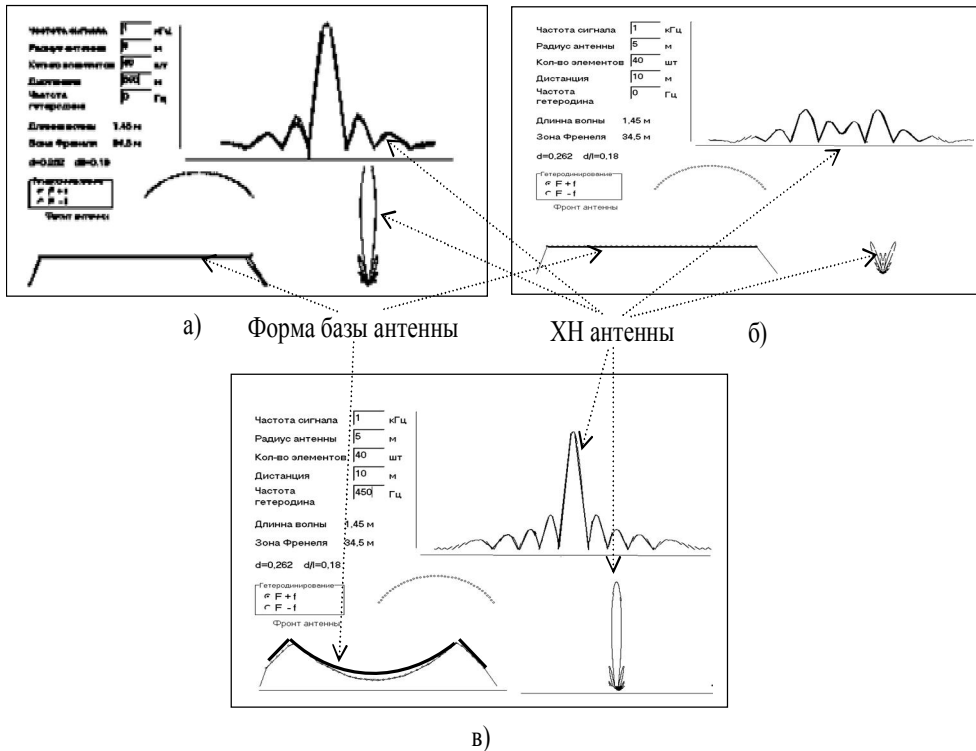


Рис. 5. Характеристика направленности многоэлементной цилиндрической антенны при:

- а) расположении источника звука в дальней зоне без гетеродинирования сигнала;
- б) расположении источника звука в зоне Френеля без гетеродинирования сигнала;
- в) расположении источника звука в зоне Френеля с гетеродинированием сигнала

На рис. 5а представлен расчет ХН (в декартовой и в полярной системе координат) и базы антенны при расположении источника звука в зоне Фраунгофера (дальней зоне). Поскольку фронт волны плоский и база антенны тоже плоская, то ХН формируется. При помещении источника звука в зону Френеля происходит развал ХН (рис. 5б). Как видно на рис. 5в, использование гетеродинирования позволяет сфокусировать базу антенны на источник сигнала и сформировать ХН при нахождении источника звука в ближней зоне (зоне Френеля). На других частотах фокусировки сигнала происходить не будет. Поэтому формирование множества баз антенны с различной кривизной позволит согласовать ФЧХ по апертуре антенны с пространственной ФЧХ сигнала на определенной частоте обнаруживаемого широкополосного сигнала и гетеродина.

Заключение

Таким образом, предложенный метод поиска амплитудно-фазового распределения сигнала по апертуре гидроакустической многоэлементной антен-



ны с использованием одновременного перебора возможных состояний кривизны фронта волны принимаемого сигнала путем гетеродинного сканирования акустического поля широкополосных сигналов позволяет сфокусировать антенну на источник многочастотного излучения. При этом потери на поиск могут быть сведены до минимума за счет исключения времени на сходимость, которые необходимы при использовании регулярных алгоритмов адаптации.

Библиографические ссылки

1. *Пространственно-временная обработка сигналов* / Под ред. проф. И. Я. Кремера – М.: Радио и связь, 1984.
2. *Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.* Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985.
3. *Растринин Л. А.* Адаптация сложных систем (методы и приложения). – Рига: Зинатне, 1981.
4. *Колмогоров В. С.* Гетеродинная обработка сигнала в многоэлементных гидроакустических системах // Сб. статей «Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ». Специальные вопросы применения и эксплуатации средств связи и радиотехнических систем ВМФ. – Вып. 43. – Владивосток, ТОВМИ, 2003.
5. *Колмогоров В. С., Алюшин Д. А.* Анализ приемной параметрической антенны обратного нелинейного рассеяния / Доклады Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. Н. Тюлина. – Владивосток, ТОВВМУ, 1992.
6. *Патент РФ № 95859 на полезную модель от 10 июля 2010 г.* Устройство компенсации кривизны фронта волны / Колмогоров В. С., Долгих В. Н., Ламека А. П., Емельянов Е. С.