

## ПОДВОДНАЯ АКУСТИКА

И. И. КОРШЕВЕР, Е. С. НЕЖЕВЕНКО



И. И. Коршевер



Е. С. Нежевенко

В 1998 г. в Санкт-Петербурге вышел в свет уникальный военно-исторический сборник «Из истории отечественной гидроакустики»<sup>1</sup>. Это книга о неизвестных прежде советских «ученых - моряках» холодной войны, вместе с инженерами-радиоэлектронщиками других направлений - специалистами по управлению, навигации и связи, в эпоху технотронной революции потеснивших на флотском Олимпе ранее бесспорных его хозяев корабелов. И хотя Института автоматики и электрометрии СО РАН там нет и в помине, но упомянутые там события и их фигуранты хорошо знакомы многим ветеранам Института не понаслышке. Вместе со всей отечественной «оборонкой» за полвека своего существования Институт пережил два четко разделяемых периода истории отечественной гидроакустики - период пассивного мониторинга гидроакустических полей (60-70-е гг.) и позже становления и развития методов и средств активного зондирования и обнаружения инициируемого им эхосигнала («освещение подводной обстановки», с 80-х гг. и поныне).

Проблема измерения физических полей, естественных и инициированных, являлась одной из заглавных уже в направлениях исследований создаваемого К.Б. Карандеевым Института. В Сибирь был перенесен универсальный опыт разработок, проведенных К.Б. Карандеевым и его учениками во Львовском политехническом институте и ассоциированном с ним львовском Физико-механическом институте АН УССР. Он включал наряду с измерениями электрических и электромагнитных (Л.Я. Мизюк, Г.А. Штамбергер и др.), гравитационных (Л.Д. Гик) и тепловых (А.Ф. Котюк) и измерения акустических полей (Б.Н. Синицын, Б.И. Швецкий и др.). Самы точечные измерения, как правило, не являются самоцелью - по совокупным (в пространстве и во времени) измерениям можно локализовать источник излучения и по возможности оценить его кинематические параметры - траекторию

движения, скорость и пр. Эта проблема, в то время стыдливо именовавшаяся «дистанционными измерениями» (или еще - «измерениями в недоступной точке»), имела ярко выраженное «двойное назначение» и была прежде всего ориентирована на нужды бурно развивавшихся в тот период геофизических исследований в сибирском регионе. Наследники зачинателей этих направлений в Институте и поныне успешно трудятся в соседних институтах СО РАН, до сих пор целенаправленно ориентированных на решение упомянутых задач.

Техника измерения подводных акустических полей развивалась одновременно с появлением и совершенствованием подводного флота. Осмысление опыта, накопленного странами-участницами Второй мировой войны (прежде всего - в области радиосвязи и радиолокации), в 50-е - 60-е гг. привело к бурному переносу методов и идей статистической физики в прикладные области. Так появились теория оптимальной фильтрации (А.Н. Колмогоров - Н. Винер), теория информации и кодирования (В.А. Котельников - К. Шеннон) и теория квантования (В.А. Котельников - Г. Найквист - К. Шеннон), которые позже легли в основу созданной Н. Винером кибернетической «сверхтеории». Взаимопроникновение этих работ с математической статистикой и статистической физикой привело к появлению теории и практики обработки сигналов, одному из первых детищ междисциплинарной эпохи конца XX в., «зоне внедрения» методов математической физики в технику. В этот период в стране появился ряд блестящих обобщающих монографий отечественных авторов (Б.Р. Левин, С.М. Рытов, В.И. Тихонов, А.А. Харкевич), до сих пор являющихся настольными для специалистов, занимающихся обработкой сигналов в различных прикладных областях.

Информационное оценивание сигнала в шуме и оптимальная фильтрация были определены в числе главных направлений деятельности Совета по кибернетике при Президиуме АН СССР, возглавлявшегося А.И. Бергом<sup>2</sup> - флотским радиоинженером и академиком-адмиралом, одним из «соучредителей» (как сказали бы сегодня) ИАиЭ СО РАН. К. Б. Карандеев являлся членом Совета по кибернетике в период его становления, и, таким образом, проблема дистанционных измерений была прописана за Институт на самом высоком уровне.

XXX

Пассивные дистанционные измерения имеют много общего с астрономическими наблюдениями, а гидроакустические антенны - с телескопом, в линейной детерминистской модели оптическим, а в статистических и вероятностных моделях - с радиотелескопом. С другой стороны, теория связи позволяет рассматривать такой «подводный телескоп» как приемник со специфически интерпретируемыми атрибутами - каналом передачи сигнала (волноводом, передаточная функция которого описывается физически содержательным ядром интегрального уравнения - «функцией Грина»), собственной передаточной функцией (аппаратной функцией телескопа, или характеристикой направленности антенной решетки, представляющей собой импульсный отклик пространственно распределенной системы приемников в полярных координатах) и внешними шумами.

Сколько-нибудь состоятельные измерения имеют смысл лишь в том случае, когда заведомо известна аппаратная функция прибора. В дискретных антенных решетках в качестве «фокусирующей линзы» выступает пространственно-временной фильтр, тестирующий приход плоской волны со всех направлений интереса. В идеальной среде волновое поле хорошо описывается методами линейного анализа - волновым уравнением и его приближениями в средней (Френеля) и дальней (Фраунгофера) зонах, а сам принятый сигнал - обращением этих преобразований. В прикладном анализе распределение волнового поля в раскрытых антеннах восстанавливается с помощью двумерного спектрального анализа, чем широко пользуются для определения направления прихода сигнала (DoA, Direction-of-Arrival), и при пассивных наблюдениях этим можно ограничиться. В задачах связи или классификации необходим сам сигнал, и результаты DoA-операции используются далее для формирования характеристики направленности (ФХН - beamforming) в выбранном направлении. Затем путем подбора весовых коэффициентов в приемных цепях формирователя с помощью линейных адаптивных («винеровских») подходов удается оптимизировать фокусирующую способность антенной решетки.

Операции ФХН и DoA - это пара взаимно обратимых операций анализа и синтеза волнового поля. Работы по определению направления прихода и формированию характеристики направленности по существу не прекращались в Институте с момента его создания.

Гораздо сложнее обстоит дело с искажающими воздействиями среды, как правило, меняющимися на пути распространения непредсказуемым образом, и поэтому корректные измерения невозможны без учета этого фактора. В отличие от линейных моделей, принимаемый сигнал в этом случае интерпретируется не как плоский волновой фронт, а как его отклик на выходе фильтра, параметры которого меняются в пространстве в зависимости от локальных гидрологических свойств и характера границ волноводного канала. В этом случае говорят не об измерениях, а об оценивании, совмещающем измерения и идентификацию параметров передаточной функции среды распространения пришедшего сигнала («слепую идентификацию») в едином процессе.

В технике автоматизации с этой задачей, пожалуй, впервые столкнулись при попытках описания непрерывных (например, химических) технологических процессов; здесь следует упомянуть работы сотрудников Института 60-х гг. Б.Н. Девятова и Ф.М. Гимельштейна, пионерские в области идентификации сред с распределенными параметрами.

Математики считают такие задачи нерешаемыми («некорректно поставленными»), для физиков и тем более для инженеров, решаемых задач не существует в принципе. Компромисс был найден в «методе проб и ошибок» (у математиков - «условно корректный подход»). В технических приложениях обычно рядом допущений такие «неподъемные» модели математической физики упрощают до арифметических выражений, отображающих в логарифмической шкале баланс компонент излучаемого и принимаемого сигнала и шумов<sup>3</sup>. Эти простейшие модели распространения сигнала в пространственно неоднородной среде («уравнение радиолокации», «уравнение гидроакустики», являющиеся скорее неравенствами) представляют собой технический сублимат фундаментального закона сохранения энергии и до сих пор являются исходными при

<sup>1</sup> Из истории отечественной гидроакустики. Сборник статей, очерков, воспоминаний / Сост. Я.С. Карлик / СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1998.

<sup>2</sup> Полное название Совета, созданного в 1959 г. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР. До создания Совета А.И. Берг возглавлял Научный совет по радиофизике и радиотехнике АН СССР, куда входил и К. Б. Карандеев.

<sup>3</sup> Выдумка военных инженеров Второй мировой войны, позже в прикладной математике получившая название «каркаса решения».

проектировании радиолокационных и гидроакустических систем, а в последнее время - и при оперативном оценивании параметров сигнала. Оценивание эффективности проектируемой системы при этом осуществляется путем многокритериальной оптимизации, где в качестве целевой функции выступает отношение сигнала к шуму (или некий функционал от этого отношения, характеризующий статистическую устойчивость оценки), а в качестве факторов, влияющих на ее поведение, - множество параметров, характеризующих силу исходного сигнала, усиление приемного устройства, потери распространения, возникающие в подводном канале, и шумовые характеристики окружающей среды распространения сигнала (в том числе и платформы носителя).

Корректная постановка задачи гидроакустики во всей полноте уводит в специальные вопросы физической океанологии, а та в свою очередь требует данных о результатах мониторинга среды распространения подобно тому, который существует в дальней радиосвязи или в загоризонтной радиолокации. Прогресс в области гидроакустики определяется прежде всего степенью реалистичности используемых моделей, увеличивающейся по мере сближения уравнения математической физики с "уравнением сонара", осуществляющегося совместными усилиями гидрофизиков, прикладных математиков, инженеров и практикующих операторов-гидроакустиков. Это сотрудничество характеризуется и элементами состязательности: специалисты, разрабатывающие модели, стремятся минимизировать зависимость от данных мониторинга ("робастный подход"), те же, кто "слушает океан", совершенствуют методы мониторинга и расширяют их разнообразие, уточняя (или отвергая) предлагаемые модели.

Пониманию проблемы дистанционных измерений в Институте способствовала среда профессионального общения - на первых порах со специалистами в области волновых процессов (виброметрия, интерферометрия), а позже - в области нелинейных явлений.

Пассивные гидроакустические наблюдения (пеленгация) - это задача распознавания образов: из оцениваемого хаоса необходимо выделить информационно содержательные признаки, а затем - путем сопоставления с образцами, - выделить и по возможности классифицировать сам сигнал. Задача услож-

нена тем, что к настоящему времени Мировой океан наполнен шумами надводного судоходства - гражданского и военного. Отсюда такой интерес к акустическому следу ("звуковому портрету") - спектральному представлению шумовых сигналов, излучаемых подводными и надводными объектами, своими и "чужими", располагаемая которым, можно снизить уровень неопределенности в процессе обнаружения. Чем подробнее каталоги таких портретов, которыми обладают операторы-гидроакустики, тем выше вероятность обнаружения цели - при обязательном условии, что место оператора оснащено адекватными вычислительными мощностями<sup>4</sup>.

Советская вычислительная техника в тот период переживала бурный рост, однако отечественные разработки были ориентированы в основном на стационарные системы. С мобильными вычислителями в стране получалось хуже - отставала "элементная база". К тому же компьютерные монстры, заполнившие в 70-х гг. обширные помещения отечественных вычислительных центров, оставаясь тем не менее прямыми наследниками арифмометров и «счетно-решающих устройств» довоенного времени, не были приспособлены к оперативному обмену данными с внешним миром в реальном времени (режиму «on-line»). Эти аппаратные и программные расширения, сближавшие компьютер с прибором, тогда лишь осваивались. В целом проблемы реального времени и тесно с ними связанные проблемы экономизации вычислений оказали существенное влияние на развитие вычислительной техники («специализированные ЭВМ»<sup>5</sup> и смежных областей прикладной математики («быстрые алгоритмы»)<sup>6</sup>.

Институт, позиционировавший себя в те годы «на стыке» вычислительной техники и физики, стал первопроходцем этих направлений. В тот период Институт обрел прочную репутацию высокотехнологичной мастерской по разработке уникальных приборов такого назначения. На флоте были хорошо знакомы с аналого-цифровыми преобразователями (разработки лаборатории А.Н. Касперовича) и с процессором быстрого преобразования Фурье (лаборатория И.И. Коршевера)<sup>7</sup>. В начале 80-х гг. лабораториями Ю.Н. Золотухина и В.М. Ефимова был совместно разработан цифровой спектральный анализатор гидроакустических сигналов<sup>8</sup>. Отдельная история - оптоэлектронная гидроакустика, но об этом ниже.

<sup>4</sup> Впрочем, на флоте бытуют легенды об операторах, успешно проделывающих эту работу "на слух".

<sup>5</sup> Нынешние программируемые логические матрицы - прямые наследницы специализированных ЭВМ 70-х гг.

### XXX

Инженерная история гидроакустики неразрывно связана с развитием методологии обработки сигналов, - от «косвенных измерений» времен кибернетического периода «бури и натиска» 50-60-х гг. к нынешним встраиваемым моделям.

Усложнение задач оценивания побуждало к развитию методы «слепой идентификации», которые физики относят к «прикладным», а математики - к «некорректно поставленным» обратным задачам математической физики. Для инженеров это преодоление неопределенности, под которой принято понимать степень адекватности принятой модели. Иерархия этих уровней адекватности (процесс «прозревания» «слепой идентификации») хорошо описывается современной теорией идентификации: от простейших «нефизических» моделей (линейные время-инвариантные системы - ЛВИС), через «черный», «серый» и «белый» ящики (соответственно непараметрическое, полупараметрическое и параметрическое описания моделей) - к сложным системам с хаотическим описанием. Процесс преодоления неопределенности заключается в повышении отношения сигнала к шуму<sup>9</sup>. При высоком отношении сигнала к шуму и идеальных (или игнорируемых) условиях распространения для извлечения информации достаточно простой нефизической схемы измерений. На верхнем уровне иерархии, где "шумоподобный сигнал" не отличим от "сигналоподобного шума", задача может вообще не иметь модели в ее системном смысле, - оптимизационные стратегии оценивания приходится строить с помощью прагматичных неаналитических инструментов, получивших

название «мягких вычислений» (эволюционный, нейроподобный или нечеткий подходы). За повышение преодолеваемого уровня неопределенности приходится расплачиваться усложнением модели<sup>10</sup>.

Эта иерархия отображает и историю развития средств измерения и приборостроительной базы обработки сигналов. Признаком зрелости новых идей преодоления неопределенности является появление быстрых алгоритмов и адекватных архитектур, фиксирующих достижение некоторого критического уровня сложности, делающего новые представления практически полезными.

На всех этапах описанной иерархии компьютер незаменим в процессе предварительного моделирования, однако его использование в реально действующих системах вовсе не предопределено<sup>11</sup>. Всякий раз приборостроение выискивало адекватные средства для освоения новых системных и системотехнических представлений. Первый этап описанной иерархии, возникший из преобразований Лапласа и Фурье, породил цифровые фильтры и процессоры быстрого преобразования Фурье. Далее техника обработки сигналов осваивала методы извлечения информации из данных, обработанных в статистическом анализе стационарных временных рядов. Для этого понадобились эффективные алгоритмы разложения и обращения матриц различного типа - и они появились, воплотившись в поточных (систолических) матричных процессорах.

На современном этапе практика (мобильная связь, повышение скорости носителей и целей в радио- и гидролокации) требует обновления аппарата моделирования на основе представления динамических систем, порождающих

<sup>6</sup> В 2000 г. американский журнал "Computing in Science and Engineering", издаваемый совместно институтами IEEE (инженерия) и AIP (физика), отобрал десять вычислительных алгоритмов, оказавших в XX в. наибольшее влияние на развитие науки и техники. Половина из них принадлежит алгоритмам обработки сигналов, два из которых, в частности относящиеся к матричным вычислениям, позже легли в основу техники систолических матричных процессоров.

<sup>7</sup> В 1975 г. в СКБ научного приборостроения СО АН СССР с помощью периферийного процессора быстрого преобразования Фурье была создана система восстановления в реальном времени цифровых СВЧ- и акустических голограмм, «локатор в ближней зоне», первая в стране система визуализации скрытых минных закладок.

<sup>8</sup> Тем не менее перестройку отечественный подводный флот встретил, будучи оснащенным аналогичными приборами разработки датской фирмы Bruell & Kerg. Чтобы разрешить внедрение «буржуазной» техники на секретные борты, понадобилась специальная директива Главкома; по слухам, в результате советской перестройки фирма Bruell & Kerg обанкротилась.

<sup>9</sup> Трудности преодоления многочисленных неопределенностей при решении проблемы «слепой идентификации» во все времена порождали соблазн встроить в таинственный пространственно-временной оператор среды распространения «нечистую силу» (телепатия и экстрасенсорика 60-70-х, «торсионные поля» и «вакуумные домены» 80-90-х, и пр.), и становились головной болью для Комиссии по борьбе с лженаукой РАН и Комитета по научному расследованию заявлений о паранормальных феноменах (CSICOP) в США.

<sup>10</sup> В термодинамической (или теоретико-информационной) интерпретации мерой неопределенности является энтропия, имеющая на каждом уровне сложности свой физический смысл, а сложность модели оценивается с помощью алгоритмического (по Колмогорову) или информационного (по Шеннону) критерия.

<sup>11</sup> Более того, встреча практического приборостроения с компьютером произошла лишь в начале 70-х гг., когда в архитектуре компьютера появились гибкие аппаратно-программные средства ввода/вывода.

нестационарные процессы, в пространстве состояний, как это уже произошло в теории управления двадцать лет назад. Накопление, господствовавшее в анализе стационарных процессов, сменилось обработкой последовательности событий (сцен) с последующим совмещением выводов в непротиворечивой траектории движения системы. При этом приходится извлекать информацию о полезных данных и шуме из выборочных плохо определенных статистик. На смену вариационному анализу, лежащему в основе адаптивных процессоров прежней поры, пришли методы стохастической оптимизации. Архитектуры, адекватные оптимизационным процессам, осваиваются и в технике обработки сигналов.

XXX

Техника моделирования гораздо старше компьютера: интерес к электронным моделям возрос одновременно с развитием теории электрических цепей и совершенствованием их электронных компонент. Свои кибернетические идеи Винер вынашивал, проектируя систему электронного моделирования, предназначенную для управления зенитным огнем. Первый советский компьютер выиграл в 1953 г. непрямую конкурентную борьбу у вычислительной системы, представлявшей собой сеть электронных (цифровых) моделей<sup>12</sup>.

В системе электронных моделей интегрировано дифференциальное уравнение, описывающее динамическое поведение объекта или процесса, имитируется с помощью электрической цепи, на выходе которой сигналы своими переходными процессами отображают частные решения этого уравнения. Электронное моделирование всегда привлекало пользователей своим естественным параллелизмом, сводящим к минимуму заботы программирования<sup>13</sup>, мгновенным быстрым действием, недоступным первым отечественным компьютерам, и простотой ввода/вывода. В реально функционирующих системах управления электронные моделирующие системы можно встретить и в наше время.

По этим причинам история элементной базы техники моделирования не совпадает с историей компьютеростроения, а параллельна ей, питаясь вместе с вычислительной техникой от физики твердого тела ее разработками. На каком-то этапе (конец 60-х - начало 70-х гг.) в полупроводниковых технологиях образовался "застой", вызванный "перестройкой" полупроводниковой промышленности: в "пробирочном" исполнении физических лабораторий все вопросы создания кремниевых сред высокого

уровня интеграции к тому времени были решены, однако к промышленному освоению этих результатов не была готова технологическая оснастка поддержки массового производства таких схем (микролитография, манипуляторы-сборщики, контрольно-измерительная техника и пр.)<sup>14</sup>. Среди физиков-материаловедов не прекращались споры о сравнительных достоинствах пленочной, твердотельной и гибридной технологий, германия и кремния<sup>15</sup>. По обе стороны океана на кону в споре стояло будущее вычислительной техники и, соответственно, немеренные инвестиции, так что страсти накалялись нешуточные. В этот период возродился интерес к альтернативным способам моделирования динамических систем.

Линейные оптические модели близки моделям теории электрических цепей и электромагнитного поля, и возникновение идей оптической обработки в лоне линейной теории оптического поля и в научной среде, близкой оптическому приборостроению, не является случайностью. Квазиоптические методы акусто- и радиолокации широко обсуждались специалистами в соответствующих областях сначала в методическом, а позже и в реализационном плане. Синтезированная апертура радиолокатора бокового обзора, полученная в результате прямолинейного перемещения самолета-носителя, естественным образом образовывала голографическое изображение, и "замороженный" на фотоленте-носителе волновой фронт (в зоне Френеля) далее восстанавливался на земле с помощью оптического процессора и фоторегистратора. Аналогичным образом можно было восстановить сложные акустические интерферограммы, полученные, например, в результате анализа вибрационных полей.

Весьма заманчивым казалось на первых порах использование Фурье-оптики в когерентном свете для моделирования процессов пространственно-временной фильтрации и восстановления зашумленных и искаженных изображений. С помощью голографического процесса в когерентном свете при калибровке антенных решеток восстанавливалось их волновое поле в ближней, а затем - с помощью компьютерной экстаполяции, - и в средней, и дальней зонах. В процессе восстановления голограмм решается интегральное уравнение Фредгольма, моделирующее фундаментальный процесс идентификации аппаратной функции оптического прибора. Макет восстановления волнового фронта антенной решетки (DoA-процессор) был создан и в Институте (П. Е. Твердохлеб).

В те годы энтузиазм, порожденный успехами оптической обработки, перекинулся и на "большое" компьютеростроение. Возникло и живо обсуждалось несколько проектов оптического универсального компьютера. Особое внимание привлекали наиболее продвинутое к тому времени оптоэлектронные технологии - приборы, использующие эффекты поверхностных акустических волн (ПАВ), и металлооксидные (МОП-) структуры динамических регистров (приборы с зарядовой связью, ПЗС-приборы). Обе эти технологии естественным образом реализовывали вычисление скалярного произведения двух векторных структур вводимых данных, в частности - операции свертки сигнала в реальном времени с фиксируемым или меняющимся окном фильтра (ПАВ на высоких частотах, ПЗС-структуры - на средних). Это открывало большие возможности для приборной реализации широкого круга алгоритмов на первых двух уровнях описанной системной иерархии<sup>16</sup>.

Наиболее законченную форму идеи оптоэлектронной обработки сигналов обрели в проекте «Оптоэлектронная гидроакустика», выполненном в Институте коллективом авторов под руководством Е. С. Нежевенко. В 1989 г. на конкурсе прикладных работ СО РАН эта работа была удостоена высшей награды.

Фотоприемные дискретные динамические ПЗС-структуры представляют собой синхронно сдвигаемый регистр, каждая ячейка которого содержит электронный заряд, способный накапливать сигналы, поступающие от внешнего некогерентного светового луча. Далее производится считывание всего накопленного на

этих ячейках зарядового рельефа, генерируемого проецируемым на ПЗС-линейку изображением. Несложно развить аналогию между таким открытым регистром и трансверсальным фильтром, на котором построена вся линейная обработка сигналов, однако в отличие от жестких цифровых структур здесь появляется возможность гибко программировать весовые коэффициенты (путем модуляции луча) и точки отвода фильтра (координаты светового пятна), причем последние могут быть заданы и в дробной шкале задержек и интерполированы на соседние ячейки формой (апертурой) светового пятна. Мы получили элементарно простую ячейку канонической схемы ФХН, содержащей линии задержки, выравнивающие время прихода плоского волнового фронта, с последующим суммированием задержанных таким образом сигналов<sup>17</sup>. Весовые коэффициенты открыты для дальнейшей его оптимизации внешним компьютером. ПЗС-матрица, содержащая несколько таких регистров, реализует одновременно ФХН в нескольких направлениях, для чего необходимо осуществить сканирование сигнального луча поперек матрицы по траектории, определяемой формой решетки или волнового фронта<sup>18</sup>. Программируемость совокупности задержек открывает путь к формированию фронта любой формы для линейных решеток, или, что более важно, позволяет программировать решетку произвольной формы (так называемую «конформную антенну») на плоской волне.

Ко времени разработки этого проекта оптоэлектронные компоненты уже широко

<sup>12</sup> Один из первых советских компьютеров БЭСМ-1 был создан в 1953 г. в Институте электромеханики АН УССР (г. Киев) по инициативе академиков М.В.Келдыша и М.А.Лаврентьева под руководством С.А.Лебедева и М.Р.Шура-Бура.

<sup>13</sup> Программирование задачи в первых разработках аналоговых моделирующих систем производилось с помощью штеккерных коммутаторов на передней панели. Более поздние разработки цифровых моделей ("дифференциальные анализаторы") управлялись встроенными микроконтроллерами с удобным графическим языком управления.

<sup>14</sup> Перенос высоких технологий из академических лабораторий в промышленность, формировавший в те годы облик нынешнего миропорядка, стал «ахиллесовой пятой» советской экономики. Создание современной микроэлектронной промышленности требовало не меньших усилий и затрат, чем незадолго до этого достигнутые победы советской техники в космосе и в атомной энергетике, но в те годы в стране уже не было ни достаточных ресурсов, ни достаточного понимания проблемы со стороны начальства, ни, наконец, Курчатова с Королевым, чтобы совершить очередной рывок к «экономике знаний».

<sup>15</sup> Победил кремний; тонкопленочные и гибридные технологии ныне берут реванш в микромеханике.

<sup>16</sup> Приборы, использующие эффект ПАВ, нашли широкое применение в приемных трактах радиолокаторов и бытовых телевизоров. ПЗС-структуры в конце концов состоялись в видеотехнике и в массовой динамической памяти.

<sup>17</sup> Еще недавно геофизическая сейсморазведка собирала «в поле» (летом) рулоны бумажных лент с записанными на многоперьевых самописцах «трассами» сигналов отклика от взрыва (или от искусственных колебаний), зафиксированными от отдельных сейсмоприемников линейной приемной решетки. Затем (зимой) лаборантки, раскатав рулоны, с помощью рейсшины пересекали множество трасс перемещающимся пучком «волновых фронтов» и далее кронциркулем измеряли те их значения, координаты которых попали в точки пересечения (пучка и осей трасс). В завершение с помощью «железного Феникса» эти значения суммировались, образуя таким образом одну точку (для всего пучка одно сечение) сейсморазреза в соответствующих координатах. Оптоэлектронный ФХН моделирует именно эту методику.

<sup>18</sup> Для линейной эквидистантной антенны и плоской волны траектории сигнального луча имеют вид семейства синусоидальных волн.

применялись на различных участках тракта гидроакустического сигнала. Оптоволоконный гидрофон преобразует оказываемое на него давление в изменение коэффициента преломления оптоволокна, модулируя таким образом фазу передаваемого через него светового потока, - на этом принципе построены чрезвычайно чувствительные интерференционные акустические приемники. Далее генерируемый таким образом оптический сигнал собирается с антенного пространства в ФХН с помощью оптоволокна. О голографическом методе предварительного определения направления приема (DoA) мы упоминали выше. Проект оптоэлектронного ФХН замыкает весь тракт предварительной обработки гидроакустических сигналов в едином оптоэлектронном исполнении - от сбора данных до формирования пространства лучей. Результирующая производительность описанного оптоэлектронного процессора оценивается в  $10^{12}$  операций в секунду.

За прошедшие с тех пор два десятилетия в отечественной промышленности решены многие вопросы интегральной оптики, которые были «узкими местами» в описанных проектах: появились эффективные компактные модуляторы света и дефлекторы, управляющие световым лучом, многие решения сегодня возможны в интегральном исполнении. Возврат к идеям оптоэлектронной гидроакустики на новом технологическом уровне вполне согласуется с современной тенденцией «мягких» гибридных вычислений.

### XXX

В истории совершенствования оружия уничтожения и средств защиты от него во все времена, увы, находящегося на переднем крае технического прогресса человечества, прослеживается много элементов социального дарвинизма. "Подводная охота" описывается теоретико-игровой моделью, в которой из двух хищников побеждает тот, у которого более развиты средства маскирования и обнаружения опасности. При этом даже сопоставление "убойной силы" не имеет решающего значения. Подводный флот за время своего существования пережил естественную эволюцию, выжив лишь благодаря появлению бесшумных движителей. Американцы стали заказывать коленчатые валы приводов для своих атомных подводных крейсеров у швейцарских часовщиков, испытывавших в то время проблемы с нагрузкой своих производств в связи с наводнением рынка дешевыми электронными часами<sup>19</sup>. Стали тише в ходу и советские

подводные лодки. В результате получить звуковой портрет нового подводного судна оказалось затруднительным даже на собственных стендовых испытаниях.

Незадолго до начала войны основатель отечественной гидроакустики Л.М. Бреховских впервые описал звуковой канал глубоководья, склонный к самофокусировке: минимизируя энергетические потери, звук на пути распространения «скатывается» в зоны, где его скорость распространения в воде минимальна («звук ленив» - говорят американцы; позже подтвержденная экспериментами эта модель получила имя SOFAR - Sound Fixing and Ranging). Важно лишь определить профиль скоростей по глубине океанической толщи, зависимость которого от температуры, давления и солености измеряема. Интенсивные гидроакустические исследования привели к картированию звуковых каналов по всему Мировому океану, попав в которые, звук может распространяться с минимальными потерями на тысячи километров, слабо изменяя свою трассу в зависимости от времени года. На базе этих исследований за период «холодной войны» обеими сторонами были созданы эффективные береговые системы акустического мониторинга. Шельф и все вершины подводных гор по океаническому периметру США оснастились гидроакустическими системами подводного прослушивания, связанными с Центром океанического акустического мониторинга<sup>20</sup>.

Эти обстоятельства сделали безальтернативными активные методы акустического зондирования, ранее считавшиеся неэффективными по причине неизбежно сопутствующего активному излучению демаскирования платформы-носителя.

Долгое время казалось, что обработка отклика от зондирующего сигнала значительно проще пассивного обнаружения. Действительно, опорный сигнал известен и вместо «угадывания» звукового портрета противника достаточно устроить грамотную согласованную фильтрацию. В таком виде гидролокационные методы освещения подводной обстановки в открытом океане и в условиях глубоководья к этому времени были достаточно развиты и успешно применялись. Основные подходы активного зондирования в океане были заимствованы из арсенала радиолокации, где проблема среды распространения сигнала стоит не столь остро и худо-бедно работают простейшие лучевые модели. Новые осложнения возникают в шельфовой зоне и на мелководье, куда со временем были перенесены стратегические интересы всех стран, омываемых Мировым океаном. Здесь среда

распространения имеет тесные размытые границы, что приводит к многолучевости распространения (эффекту реверберации). Эти сложности чрезвычайно заострили проблему насыщения систем обработки гидроакустической информации физическим содержанием. Здесь чрезвычайно плодотворным оказалось взаимодействие нашего Института с Институтом прикладной физики (А.В. Гапонов-Грехов, ИПФ АН СССР, ныне ИПФ РАН, Нижний Новгород), который к тому времени продвинулся достаточно далеко в изучении подводного звукового канала и реверберационных процессов.

Тем временем высокоинтегрированные кремниевые структуры дозрели, наконец, до массового производства - и разговоры об оптическом компьютере сразу поутихли. В 1974 г. на рынке вычислительных средств появился первый микропроцессор, революционизировавший системы автоматизации, а к концу 70-х - первая суперЭВМ, революционизировавшая практику моделирования. В 1982 г. Нобелевская премия в области физики (за разработку количественной теории фазового перехода) была присуждена 46-летнему К.Уильямсу, - ни до, ни после Уильямса в таком молодом возрасте никто из физиков не удостоивался столь престижной награды. Это был численный эксперимент, выполненный на первой суперЭВМ (Cray), результаты которого впоследствии были подтверждены экспериментами<sup>21</sup>.

Позже в журнале "Proceedings of IEEE" (№1 за 1984 г.) Уильямс выступил с программной статьей "Наука, промышленность и новый японский вызов", где призывал правительство США усилить внимание к внедрению высокопроизводительных ЭВМ в промышленную практику. Геополитические опасения Уильямса оказались необоснованными, все японские фирмы-производители суперЭВМ со временем перекочевали в Калифорнию. Но с той поры методы компьютерного моделирования начали

триумфальное шествие по всему мыслимому разнообразию промышленных и научных приложений - от виртуальных ядерных испытаний до индивидуального пошива верхней одежды.

К тому времени обе революции - микропроцессорная и суперкомпьютерная, сойдясь, породили супермини-ЭВМ, способные в реальном времени решать сложные задачи автоматизации. С этого периода начинается и широкое внедрение адаптивной обработки сигналов, а позже и встроенных физических моделей, в практические системы. В согласованном фильтре, реализующем корреляционный прием, стало возможным разместить модель обратного оператора среды распространения в приемном канале (у связистов - «эквалайзер»<sup>22</sup>), а можно пропустить через «прямую» модель канала предполагаемый опорный сигнал и тем самым ослабить гипотезу неискаженного отклика, на которой построена вся классическая ("винеровская") теория оптимальной фильтрации. Кроме того, в адаптивную обработку сигналов хлынули вероятностные методы оптимизации, до той поры бывшие областью оф-лайнного "планированного эксперимента", сделавшие модели сигналов гораздо более реалистичными. Автоматизация физического эксперимента стала реальностью.

Инициатива Уилсона не осталась незамеченной и в Москве. Компьютерно ориентированные физики (а их в советской науке к тому времени тоже уже было немало), разочарованные косностью и неповоротливостью отечественных ведомств, решили взять проблему суперкомпьютеров в свои руки. В составе Академии было создано Отделение вычислительной техники. Ряду институтов поручалась разработка отечественной высокопроизводительной ЭВМ.

Идеология Уильямса была близка и Ю.Е. Нестерихину. Для него ЭВМ являлась лишь специфическим физическим прибором, способным достичь недостижимых прежде

<sup>19</sup> Для этих целей вертикально-расточные станки размещались в скальных шахтах Альп, что сводило к минимуму вибрации приводящих шпинделей. Остаточные собственные шумы эффективно погашались новыми вибропоглощающими материалами.

<sup>20</sup> Система SOSUS SOund SUrveillance System; мы знакомы с ней благодаря триллеру Дэна Брауна «Точка обмана», герои которого, по злому умыслу оказавшись на отколовшейся от шельфа и дрейфующей в Северном Ледовитом океане льдине, спасаются, подавая сигнал SOS ударами ледоруба о льдину; произведенный таким образом низкочастотный импульсный шум был принят системой SOSUS, в результате чего Центр океанического мониторинга направил в район бедствия ближайшую к нему патрулирующую подводную лодку. С нашей системой подобного назначения (АГАМ - Антенна ГидроАкустическая Морская), гораздо более скромной по масштабу, мы познакомились недавно при гораздо более прозаических обстоятельствах в связи с невольным недельным заточением группы российских подводников, осуществлявших профилактические мероприятия на одном из ее камчатских объектов, в запутавшемся в оптоволокне батискафе.

<sup>21</sup> Физики того времени сравнивали результат Уильямса с совершенным полувеком ранее открытием «на кончике пера» планеты Плутон, тогда специалисты-вычислители в области небесной механики указали астрономам, куда наводить телескоп.

<sup>22</sup> Нынешние специалисты по мобильной связи жалуются на то, что в городе и в горах «канал плохо обусловлен и тяжело эквализуется»; ничто так не свидетельствует о взаимопроникновении наук, как научно-технический жаргон.

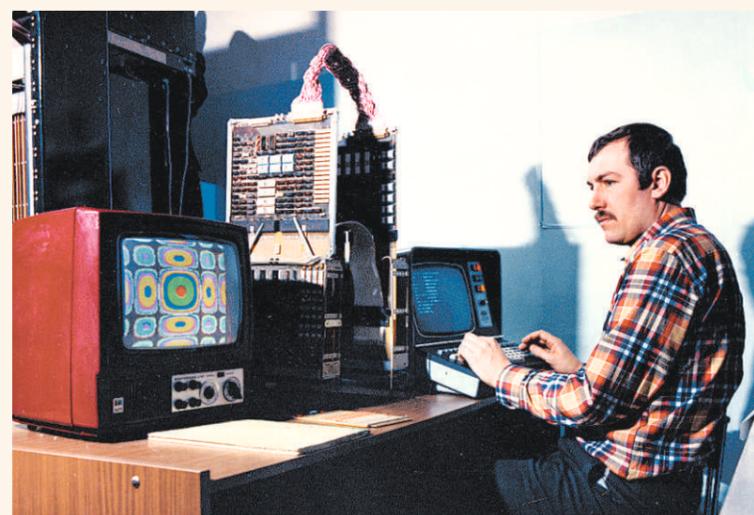


Лаборатория Коршевера.

Верхний ряд слева направо: Ю.В. Лыков, А. Воронкин, А.В. Березовский, В.В. Грушецкий, Ю.Н. Шмаков.  
Нижний ряд: И.Г. Ремель, В.А. Козлачков, А.В. Попов, М.Ю. Шадрин, И.И. Бродский.



В. А. Козлачков



В. А. Павлов

физических результатов,- вроде ускорителя, с помощью которого удастся заглянуть в микромир; прибора, разработка и изготовление которого требуют уникальных технологических усилий, но, тем не менее, вполне реальны в пределах доступных Институту средств. С конца 70-х в Институте широким фронтом развертываются работы по созданию советской супермини-ЭВМ. В качестве базовой системы была положена мини-ЭВМ СМ-4 (в оборонном варианте "Электроника 100/25"), а в качестве сопроцессора арифметического ускорителя - процессор А-12, воспроизводивший американскую модель AP-120В фирмы "Floating Point Systems" (в 1992 г. прекратившей существование) с вычислительной мощностью 10 МФлопсов (миллионов операций с плавающей запятой в секунду)<sup>23</sup>. Для этих целей в Институте была развернута уникальная по тому времени (и, пожалуй, первая отечественная) линия производства многослойных печатных плат (В.А. Белого). На основе разработок Института была собрана и освоена система проектирования таких плат (Э.А. Талныкин). Но этих мощностей явно не хватало для разработки трех десятков многослойных плат большого размера, содержащих в общей сложности около сотни коммутирующих слоев. Усилиями Ю.Е. Нестерихина в ряде оборонных предприятий столицы, оснащенных оборудованием зарубежных фирм, было арендовано несколько специализированных участков проектирования многослойных печатных плат (эту часть работы сопровождал Л.С. Тимонен).

Снабженцы Института проявили неимоверную изобретательность по части добывания дефицитных комплектующих изделий - недостающие были взяты из импортных поставок; помогли с этим и болгарские друзья. Усилиями коллектива разработчиков-отладчиков (В.А.Козлачков, С.А. Павлов и др.) осенью 1982 г. А-12 заработал на тестовых задачах.

Система, содержащая две ЭВМ, соединенные через А-12 в конвейер, дважды в - 1983-м и 1985-м гг. - устанавливалась на гидроакустическом пограничном посту в бухте Березовая южнее Петропавловска-на-Камчатке, где совместно с Нижегородским институтом прикладной физики производились комплексные исследования подводного канала при разных формах излучаемого (зондирующего) сигнала

(на удалении нескольких сот километров от бухты маневрировал подводный "заказанный объект"). Это был незаурядный по тому времени натуральный гидрофизический эксперимент, в котором участвовало в общей сложности до сотни научных сотрудников и вспомогательного персонала от ИАиЭ (лаборатории В.С. Львова и И.И. Коршевера) и от ИПФ<sup>24</sup>. Дважды на необорудованный берег было сгружено и там смонтировано свыше 70 контейнеров вычислительного оборудования. Дважды система бесперебойно работала в течение двух месяцев эксперимента, результаты которого обрабатывались на месте. Дважды совместный доклад о результатах этих исследований представлялся в Президиум РАН.

В то время в Академии бытовало мнение, что пора перераспределить усилия между космосом и океаном и наконец заняться вплотную изучением "гидрокосмоса", о котором мы до сих пор знаем меньше, чем о поверхности и окрестностях Марса. В этом контексте создание первой советской супермини-ЭВМ и ее внедрение в натурные испытания на необорудованном берегу Камчатки содержали в совокупности безусловные признаки "Большого проекта" и воспринимались заинтересованными современниками как организационный и технический подвиг. Эти эпизоды характеризуют Ю.Е. Нестерихина как незаурядного организатора научных исследований времен "позднего застоя - ранней перестройки".

Интересна дальнейшая судьба AP-120В в странах СЭВ. Под давлением Академии и Центра подготовки космонавтов, заинтересованного в этом проекте для создания синтезированной системы визуализации воздушной обстановки, которой предполагалось оснастить тренажеры космонавтов, эта разработка (не без участия Института) была воспроизведена в Воронежском отраслевом НИИ, но ее серийное продолжение оказалось ему не под силу. Гораздо дальше продвинулись болгары, претендовавшие в тот период на роль «Силиконовой долины» СЭВ. Советская геофизическая разведка взяла на вооружение болгарские рабочие станции, оснащенные периферийными усилителями, цена в этих системах, кроме их производительности, об-

<sup>23</sup> Такой производительностью обладала в то время лишь одна советская ЭВМ, специализированная для решения задач радиолокации, занимавшая двухэтажное помещение с автономной системой охлаждения; суперЭВМ Cray к тому времени достигла производительности 300 Мфлопс. Производительность нынешнего самого мощного российского компьютерного кластера МВС-1000М достигает одного терафлопс (миллион Мфлопс).

<sup>24</sup> Коллектив нижегородцев возглавлял светлой памяти Юрий Константинович Постоевко, до 1979 г. сотрудник СКБ НП, один из создателей системы автоматизации радиотелескопа РАТАН, работы, удостоенной в 1979 г. премии Совета министров СССР.

ширное прикладное программное обеспечение, в том числе и геофизической направленности<sup>25</sup>.

В конце 70х гг. фирма Texas Instruments выпустила в свет первый однокристалльный сигнальный процессор, представлявший собой микропроцессор со встроенным параллельным умножителем - сначала с фиксированной, а позже и с плавающей точкой. Современный однокристалльный процессор воспроизводит в упрощенном, местами утрированном виде архитектуру классического конвейерного суперкомпьютера Cray конца 70х гг, не уступая той модели по производительности. Этим была открыта эра встраиваемых моделей, и оснащенные платами-умощнителями, содержащими однокристалльные сигнальные процессоры (или мультипроцессоры), системы реального времени потеснили супер-минисистемы. С другой стороны, появились высокопроизводительные рабочие станции (например, и поныне популярная IBM R6000), ставшие «рабочими лошадками» в центрах обработки данных. Эти два сектора - он-лайнный и оф-лайнный - поглотили с двух сторон «нишу супермини».

В этот переходный период опыт, накопленный в процессе разработки А-12, был успешно применен Институтом для создания уже полностью авторской разработки высокопроизводительной рабочей станции, содержавшей многопроцессорную плату-акселератор (В.А.Козлачков и др.). В 1986 г. система была испытана на борту подводной лодки во время учений в районе Баренцова моря на Северном флоте. С тех пор интерьер лаборатории, проводившей эти испытания, украсило свидетельство-посвящение в подводники, выдававшееся по традиции лишь на глубине 300 м ниже уровня поверхности<sup>26</sup>, а номенклатура "Высокопроизводительная рабочая станция оператора-гидроакустика" с легкой руки специалистов Института укоренилась в НИРах и ОКРах судостроительных и военно-морских НИИ.

<sup>25</sup> Система, испытанная на Камчатке, была заложена в основу проекта первого советского рентгеновского томографа. Позже в этом отпала необходимость, так как Ленинская премия была присуждена руководителям проекта еще до того, как система заработала. Отечественный рентгеновский томограф так и не появился на свет.

<sup>26</sup> Посвящение новичков, общебортовой «подводный праздник Нептуна». Этот ритуал производится в самом обширном на ПЛ помещении центрального управляющего поста при построении всего свободного от дежурств состава. Не каждому посвящаемому удается опорожнить вывинченный из бортовой электроосветительной арматуры полуторалитровый плафон, наполненный заборной морской водой, так что это в какой-то мере и свидетельство мужества и физической стойкости посвященных. Вода Баренцова моря, кстати, удивительно хороша на вкус (но, конечно, не в таком объеме), в отличие от тихоокеанской, и тем более черноморской, слегка напоминает выдохшуюся «Боржом», только что вынутую из холодильника.

<sup>27</sup> Глубинный профиль скоростей обычно представляется в виде ломаной линии, содержащей пять сегментов: три относящихся к водной толще и два к поддонным (осадочному и коренному) слоям.

<sup>28</sup> В активном режиме метод согласованного поля служит лишь уточнением результатов первоначального обнаружения, играющих роль начальных условий в дальнейшем процессе уточняющего поиска.

XXX

Остановимся кратко лишь на трех подходах, находящихся сейчас "в работе" в исследовательской вычислительной гидроакустике.

Классическая согласованная фильтрация не адекватна задаче обнаружения нестационарных сигналов в смеси с негауссовой помехой. Даже при активном зондировании, когда известна форма излученной посылки, мы не знаем, какой вид обрел отклик, многократно рассеянный на локальных неоднородностях среды распространения и отраженный от ее границ. Кроме того, в силу конечной ширины характеристики направленности излученного и отраженного импульсов (раскрыва антенны и эффективной поверхности рассеивателя цели) возможно одновременное распространение отклика по нескольким каналам. Предсказать вид принимаемого сигнала помогают модели волнового уравнения, решаемого для каждой точки обозреваемого пространства (а в широкополосном сценарии - и для каждой предполагаемой частоты) при известном профиле скоростей распространения звука и известных границах среды<sup>27</sup>. При таком подходе, получившем название "метода согласованного поля", согласованная фильтрация реализуется для каждой из таких точечных гипотез<sup>28</sup>, и далее отклики согласованного фильтра, аналогично радиолокационному изображению, отображаются в виде "поверхности неопределенности" в пространственных координатах. Полученное "поле откликов" является исходным для решения задачи обнаружения. Современная техника радио- и гидролокационного обнаружения широко использует методы компьютерного зрения: каждая тестируемая ячейка "поверхности неопределенности" обрабатывается в контексте своих окрестностей, а дальнейшему сопоставлению подвергаются признаки сигнала (а не сам сигнал).

Эффективная реализация этого метода требует экономичных схем решения волнового

уравнения. Нужны "быстрые алгоритмы" и экономичные аппаратно-программные решения. Как тут не вспомнить о ПАВ- и ПЗС-структурах и об оптоэлектронной гидроакустике!

Упомянутый выше глубинный профиль скоростей является компактной характеристикой среды распространения, и его оценка становится наиболее важной задачей оперативной гидроакустики. В этих целях все шире применяется дистанционное зондирование среды. Последующая обработка отраженного зондирующего сигнала производится с помощью частотно-временного представления нестационарного отклика, пришедшего из анализа линейных систем с времязависимыми параметрами. В таком представлении сигнал (а после его локализации - геометрические координаты среды) в каждой точке характеризуется амплитудофазовым распределением в координатах "дальность-доплеровский сдвиг" - реальным отображением хорошо знакомой радиолокационщикам идеальной функции неопределенности излученного сигнала. Локальные частотно-временные характеристики отраженного зондирующего сигнала данной формы исчерпывающим образом характеризуют его взаимодействие со средой в тестируемом пространстве и все шире используются для прогнозирования эффективности канала в беспроводной связи<sup>29</sup>.

Идентификация локальных параметров среды распространения открывает возможности глобальной оптимизации процесса гидролокации. Синтез оптимальной формы излучаемого сигнала приобретает корректную целевую функцию, учитывающую локальные характеристики рассеяния и поглощения, эффективную поверхность цели и многообразие перетражений (или - при многокритериальной оптимизации - все эти параметры одновременно). Именно таким образом (в ультразвуковом диапазоне) работает биологический сонар летучей мыши.

Освоение этих методик требует средств оперативного зондирования среды, но уже сейчас проводятся эксперименты по совмещению процессов зондирования и синтеза оптимальной посылки в реальном времени.

И, наконец, пришедшая из радиолокации бокового обзора синтезированная апертура,

позволяющая достичь сверхразрешения за счет когерентного накопления множества откликов при движении носителя - путем удлинения виртуальной решетки. В гидроакустической среде гораздо слабее, чем в радиолокации, сохраняется когерентность излученного сигнала, и проблема фазовой коррекции, занимающая радиолокацию лишь в последнее время в связи с повышением маневренности носителей<sup>30</sup>, здесь стоит чрезвычайно остро, главным образом из-за размывания фазы локальными неоднородностями среды (проблема SAS-MOCOMP - компенсации движения при синтезировании гидроакустической апертуры). Тем не менее, по опубликованным источникам, с помощью сверхнизкочастотных (2 Гц) посылок сложной формы на расстоянии 25 км удается достичь разрешения 6 м. Это достигается средствами навигационной коррекции, совместной корреляционной обработкой сегментов, относящихся к последовательности гудков, и автофокусировкой - совместной фазовой обработкой сигналов, поступающих от элементов разрешения с одной и той же дальности (фазового рельефа принимаемого сигнала).

В завершение отметим, что гидроакустика, которой в 70-е гг. занималась добрая половина Института, казалось бы навсегда исчезнувшая из него в годы перестройки, за последние годы стараниями дирекции возродилась, как птица Феникс из пепла. На новом этапе она развивается в основном в направлении компьютерного моделирования систем обработки гидроакустических сигналов. Так, была выполнена работа по разработке системы идентификации объектов по их гидроакустическим полям в условиях сложной помехо-сигнальной обстановки (мелководья, изрезанной береговой линии), что особенно важно при борьбе с терроризмом и браконьерством. А работа, которая ведется в настоящее время, - это компьютерное моделирование описанного выше синтеза апертуры, необходимого в случае, когда невозможно использовать крупногабаритные протяженные гибкие буксируемые антенны, например, если носителем гидроакустического комплекса является гидросамолет или катер.

<sup>29</sup> В бортовой радиолокации на этапе обнаружения реальное радиолокационное изображение сопоставляется с периодически обновляемой "помеховой картой", подготавливаемой с помощью специализированных наземных метеорологических радаров.

<sup>30</sup> Синтезированная апертура первоначально использовалась лишь на бортах специальных разведочных самолетов-носителей (в США это известные системы AVAX), в проектах которых стабильность параметров полета была предметом специальной заботы; ныне синтезированная апертура стала атрибутом боевой оснастки высокоманевренных самолетов-перехватчиков.

XXX

Перечитав этот текст, авторы не обнаружили в нем обязательных для мемуарного жанра свершений и побед. Лишь одни усилия доказать что-нибудь разумное - макеты, эксперименты, публикации, презентации, одним словом, «внедрение» - понятие, не имеющее точного соответствия ни в одном из европейских языков. Следы многих лабораторных разработок Института теряются в НИРах/ОКРах отраслевых промышленных гигантов. Но не в этом ли роль Академии в научно-техническом

прогрессе - приумножать Знание, посильно способствуя его приходу в Технологии?

Сегодня подводная акустика ассоциируется в общественном сознании главным образом с шельфовой нефтеразведкой, где ее достижения впечатляющи. Но на очереди рыбаки, подводные экологические и биоресурсные исследования, подводные археологи, наконец. Ультразвуковые технологии пришли в медицинскую диагностику. Все эти приложения, как правило, чрезвычайно наукоемки (точнее, «физикоемки»). К сожалению, пока присутствие Российской академии наук в этих задачах мало заметно.