

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 551.501.8:621.396.96

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, М.В. КУШНИР,
Е.И. ОЛЕЙНИКОВА*

ФОРМИРОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ НАУКИ В ОБЛАСТИ СИСТЕМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Введение

Метод радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ) основан на измерении радиолокационным способом скорости распространения пакета звуковых волн, излученных в атмосферу. С использованием данного метода возможно определение основных параметров атмосферы, таких как температура воздуха, скорость и направление ветра, направление, влажность, параметры турбулентности.

Метод РАЗ прошел определенный путь в процессе своего развития. В статье проанализированы известные научные и практические результаты и выделены основные этапы формирования основ науки в данной предметной области.

Анализ этапа формирования эмпирических основ науки

Наука представляет собой деятельность по получению нового знания и результаты этой деятельности в виде системы полученных к данному моменту знаний о явлениях некоторой предметной области [1]. Вначале формируются эмпирические основы науки. Начальная стадия развития метода РАЗ также происходит на эмпирическом уровне. Метод был предложен сразу как практический для определения метеопараметров до высот в несколько десятков километров. Однако многочисленные аспекты распространения звука в реальной атмосфере и механизма взаимодействия радиоволн со звуком не были к тому времени в достаточной степени изучены. При испытании первой установки радиоакустического зондирования [2] не удалось получить отраженный радиосигнал с высот более 30 м, поскольку применялись высокие частоты звуковых колебаний (десятки килогерц), которые быстро затухают, и теоретические и практические работы в данном направлении были надолго прекращены.

Новая волна интереса к методу РАЗ возникла в начале 70-х годов, когда американский ученый Маршалл [3], опираясь на исследования, выполненные Харрисом [4], пересмотрел существовавшие энергетические представления о методе. После этого начинается интенсивное развитие метода в США, Италии, ФРГ. В бывшем СССР исследования метода РАЗ начались в 1965 г. в Харьковском институте радиоэлектроники [4]. В течение 1974 – 1978 гг. были проведены сравнительные синхронные измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра системой РАЗ-2 и датчиком 300-метровой высотной метеорологической мачты Института экспериментальной метеорологии в Обнинске [5].

Последующие стадии развития науки на эмпирическом уровне в данной и в других предметных областях характеризуются преимущественным использованием количественных методов, но в простейших формах, в виде данных – полученных результатов измерений, а также в виде эмпирических формул, непосредственно связывающих значения результатов измерений, принятых в качестве входных переменных, со значениями данных, рассматриваемых как выходные переменные. Эксперименты, выполненные в области РАЗ, показали, что форма огибающей радиосигнала, принятого со всей трассы зондирования по мере удаления звукового пакета волн, не соответствует теоретически ожидаемой

зависимости $\frac{1}{R^2}$, где R – дальность до пакета, и может сильно меняться. Эти изменения формы огибающей вызваны, прежде всего, нарушением условия Брэгга по трассе зондирования вследствие изменения температуры атмосферного воздуха с высотой, что приводит к изменению длины волны акустического излучения.

В дальнейшем исследователями был выполнен значительный объем экспериментальных работ, направленных на выяснение физической природы специфических погрешностей, существующих в данной области, разработку прогрессивных методик выполнения измерений, усовершенствования станций зондирования. Непосредственная проверка влияния нарушения условия Брэгга на точность оценивания доплеровского смещения частоты проводилась в ряде работ [6, 7 и др.]. Достаточно тщательные и неоднократные эксперименты различных авторов показали, что погрешности измерения температуры в значительной степени зависят от величины q . В ряде экспериментов связывалась форма огибающей принятого сигнала и величина наблюдаемой ошибки в измерениях температуры. Предпринимались попытки объяснения формы сигнала и величины наблюдаемой ошибки различным вкладом различных по высоте частей звукового пакета в результирующий рассеянный радиосигнал, но они не нашли соответствующего подтверждения.

Достаточно показательны результаты эксперимента, выполненного сотрудниками Института физики атмосферы, которые приведены ниже. На рис. 2 представлены три температурных профиля, полученные с использованием трех различных значений частоты звуковых колебаний, которая изменялась с дискретностью 0,21 % от значения несущей (использовались значения звуковых частот: 1 – $f_s = 2360$ Гц, 2 – $f_s = 2355$ Гц, 3 – $f_s = 2350$ Гц). Каждый из профилей осреднялся по 100 звуковым посылкам. Кружками на профилях отмечены точки, в которых значения доплеровской частоты совпали со значением частоты звука,

т.е.

в этих точках выполнялось условие Брэгга и соответствующие точки профилей не содержат в себе систематической погрешности результатов измерений. Крестиком на оси абсцисс отмечено значение температуры у поверхности земли, измеренное контактным термометром.

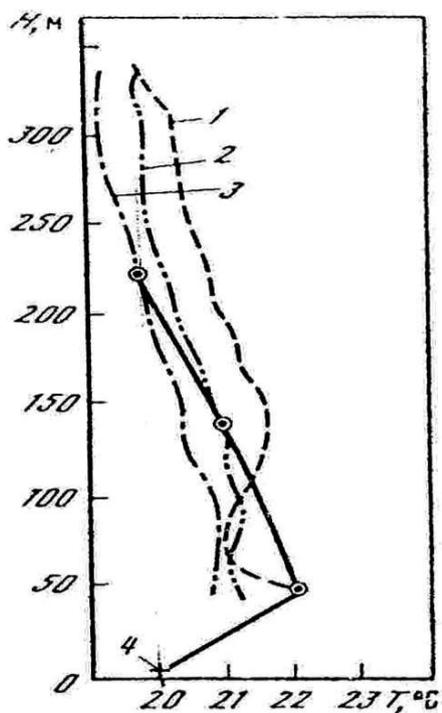


Рис. 1

Кроме того, влияние этого фактора существенно искажает температурный градиент, определяемый по результатам измерения высотного температурного профиля. Аналогичные результаты были получены также, когда данные радиоакустического зондирования сравнивались с результатами, полученными с помощью контактных датчиков. Величина систематической погрешности измерений в этом случае также находилась в диапазоне 1 – 3 К. На рис. 1 изображены профили температуры атмосферы, полученные с помощью системы РАЗ при наличии расстройки условия Брэгга.

Исследователи, обработав значительный объем экспериментальных данных, отмечают наличие связи между формой отраженного радиосигнала и величиной систематической погрешности, наблюдаемой в результатах измерений температурных профилей атмосферы [8, 9]. Предпринимались даже попытки определения величины наблюдаемой ошибки по результатам анализа формы огибающей сигнала [9]. Действительно, основная причина, основной физической механизм, влияющий и определяющий

форму огибающей сигнала и величину систематической погрешности, – это зависимость от высоты h параметра q или вертикальный профиль параметра $q(h)$ – определяющий степень расстройки условия Брэгга в каждой точке. Однако исследователям, ранее занимавшимся на рассматриваемом этапе этой проблемой, не удалось получить удовлетворительных результатов по коррекции получаемых результатов измерений, прежде всего из-за того, что отсутствовала конструктивная адекватная модель, математически описывающая указанный физический механизм. Вследствие этого в этот период не удалось разработать методы, позволяющие устранить или не допустить формирования значительной по величине систематической погрешности в результатах измерений температуры. При использовании простых зондирующих сигналов – акустического и электромагнитного, которые использовались в тот период времени, изменение с высотой метеопараметров приводит к нарушению условия Брэгга. Это, с одной стороны, приводит к уменьшению амплитуды сигнала, а с другой – к формированию ошибок измерений. Возникла необходимость частотной адаптации систем РАЗ к метеорологической обстановке.

На практике экспериментаторы использовали два метода подстройки звуковой частоты для достижения условия Брэгга [10, 11]. Первый, более точный, достигается при совпадении несущей частоты звука с доплеровским смещением частоты радиосигнала, получаемого с заданной высоты. При использовании второго – амплитудного метода – добиваются максимума амплитуды рассеянного сигнала, также получаемого с заданной высоты. Обеспечение условия Брэгга для каждой из точек профиля («площадок») путем изменения частоты излучаемого звукового сигнала вручную требует достаточно много времени, в зависимости от количества точек оно может составлять 0,5 – 2 ч [12, 7]. Такой алгоритм измерений существенно ограничивает оперативность получения профилей температуры. Кроме того, такой значительный промежуток времени соизмерим со временем квазистационарности процессов в атмосфере, в течение которого можно производить осреднение, и даже превышает его, а следовательно, на точность полученных значений существенное влияние оказывает нестационарность процессов в атмосфере. В литературе были сформулированы эмпирические рекомендации по проведению измерений с использованием систем РАЗ: с целью уменьшения величины рассматриваемой систематической ошибки следует либо уменьшать длительность акустического импульса, что снижает мощность принимаемого радиосигнала, либо обеспечивать выполнение Брэгга во всем диапазоне высот зондирования.

Следует заметить, что в существующих системах РАЗ, в том числе и при выполнении указанных выше экспериментов применяются методы оценивания доплеровского сдвига частоты или центральной (средней) частоты спектра рассеянного сигнала. На практике применяются различные методы и алгоритмы, но суть их неизменно сводится к поиску средней частоты, или частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности рассеянного сигнала. В то же время многочисленные результаты экспериментальных исследований [13, 14], выполненных при штиле и в условиях небольших значений скорости ветра, показали, что частотный спектр рассеянного на звуковой посылке радиосигнала имеет преимущественно несимметричную форму. На рис. 2 приведены частотные спектры рассеянных радиосигналов, полученных от звуковой посылки, находящейся последовательно на высотах а) 64 м, б) 90 м.

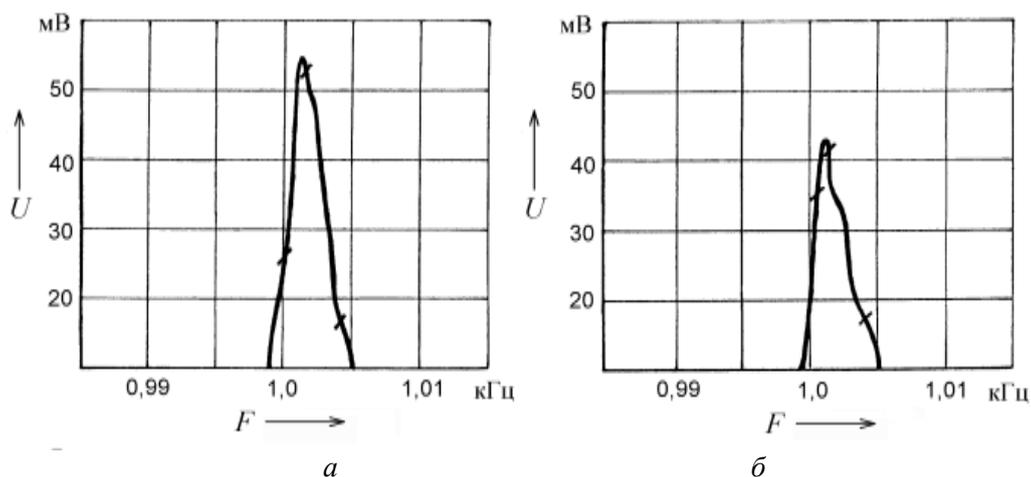


Рис. 2

Факты, полученные с помощью наблюдений и экспериментов, эмпирические гипотезы, концепции и соотношения, вытекающие из фактов, известных науке, – все это относится к эмпирическим основам науки. Польза науки на этом этапе, даже если она не достигает своего совершенства, для практики предметной области, как правило, оказывается настолько ощутимой, что побуждает дальнейшее её развитие, а недостатки используемых научных методов восполняются за счет искусства тех, кто занимается деятельностью в практике предметной области.

В целом вопросам рассеяния волн на естественных и искусственно созданных неоднородностях атмосферы в этот период, а также анализу нелинейных явлений в звуковых волнах, используемых в системах зондирования атмосферы, посвящено значительное количество публикаций [15 – 21]. Однако в них недостаточно внимания уделяется системным вопросам, в частности выяснению структурных особенностей рассеянных сигналов и анализу их статистических свойств, определению статистических характеристик флуктуаций эффективного центра рассеивающего объема и др. Практически отсутствуют конструктивные феноменологические и структурно-физические модели рассеяния, которые могли бы использоваться при синтезе оптимальных алгоритмов обработки принимаемых сигналов, анализе зондирующих колебаний и интерпретации результатов измерений.

Вопросы системного, технического характера, возникающие при разработке радиоакустических систем, решались на этом этапе инженерным, экспериментальным путем. Рассматривались возможности использования различных видов радиоантенн, акустических излучателей, радиоприемников, устройств выделения сигнала доплеровской частоты, схем и алгоритмов спектрального анализа [22, 23]. В области разработки систем радиоакустического зондирования атмосферы основными методами проектирования являются инженерная интуиция, основанная на опыте аналогичных и подобных решений в других областях, и эксперимент. Используемый для теоретических исследований аппарат, основанный на моделях и подходах, развитых в теории распространения волн в турбулентной атмосфере, хотя и позволил получить многие важные результаты, однако оказался громоздким, не эффективным и не приспособленным для решения специфических вопросов теории радиоакустических систем. Вследствие этого данный аппарат не освоен разработчиками аппаратуры и не используется ими.

Таким образом, анализ известных результатов приводит к выводу, что имеющаяся теория радиоакустического зондирования не содержит в себе эффективных теоретических методов исследования расдаров, а теория оптимизации систем РАЗ существует настолько, насколько справедливы известные радиолокационные воззрения по отношению к этим системам.

Используемый экспериментально-эвристический подход в значительной степени предопределил достигнутые к этому времени успехи в развитии метода и систем РАЗ, однако

он же и замедлил последующее развитие направления, поскольку далеко не все вопросы системного, технического характера в данной области можно эффективно решить таким путем в силу специфики РАЗ. Либо применяемые решения могут оказаться далекими от оптимальных.

Специфические особенности систем радиоакустического зондирования атмосферы обусловлены, прежде всего, особенностями использования в качестве радиолокационной цели такого необычного объекта как акустический волновой пакет. Для радиоволн данная цель является «частично прозрачным» частотно-зависимым объектом, имеющим когерентный характер распределения неоднородностей показателя преломления ε в продольном и поперечном направлениях, зависимости ε от продольной и поперечной координат могут быть адаптивным образом изменены при излучении. Объект радиолокационного наблюдения также сравнительно легко поддается воздействию атмосферных процессов и под их влиянием существенно изменяет свое местоположение, параметры движения и внутреннюю структуру. Особенности объекта накладывают достаточно жесткие ограничения на структуру и параметры излучаемой радиоволны, с одной стороны, и порождают специфические свойства рассеянного радиосигнала – с другой: сигнал содержит когерентную и некогерентную составляющие; фокусируется определенным образом в пятно на поверхности земли и т. д. Теоретическое изучение и исследование свойств радиоакустических систем, а также синтез и разработка технических решений должны носить комплексный системный характер, учитывающий взаимное влияние различных подсистем, и выполняться с использованием соответствующих подходов и адекватного математического аппарата, применяющихся в теории систем, теории стохастического оптимального управления, теории сигналов и др.

В литературе сформировалось четкое мнение [24 – 31], что разработка современных эффективных радиосистем, решающих сложные информационно-измерительные задачи и работающих в условиях разнообразной помеховой обстановки, возможна лишь на базе современных методов оптимизации. Причем, системы определенного, пусть достаточно узкого класса, имеющие характерные особенности, должны иметь собственную, адаптированную к имеющейся специфике теорию, «обслуживающую» данное направление.

Важнейшая и неотъемлемая часть теории локационных систем любого назначения – теория зондирующих сигналов. Причем следует иметь в виду, что задача выбора зондирующих сигналов применительно к радиоакустическим системам более сложна и многопланова, чем соответствующая задача радиолокационных систем, обладает большим числом степеней свободы, а следовательно, возможности оптимального или даже удовлетворительного ее решения путем случайного, интуитивного или экспериментального поиска (выбора) очень невелики. В этих условиях преобладает вероятность неудовлетворительного решения обсуждаемой задачи, что влечет за собой низкую эффективность или даже неработоспособность проектируемой системы, поскольку вид и параметры зондирующих сигналов определяют, по существу, значения ее основных информационных показателей.

Как следует из анализа литературы, в рассматриваемый период времени не существует приемлемой процедуры, позволяющей осуществлять анализ характеристик сигналов радиоакустических систем, а также производить аргументированный и акцентированный их выбор. Классическая теория анализа и синтеза радиолокационных сигналов [32 – 34], которая строится в предположении точечного характера цели и основана на использовании понятия функции неопределенности, также не может быть использована для этого. Всякие отличия форм и характеристик рассеивающего объекта от принятых предположений приводят к изменениям структуры и параметров рассеянного сигнала, а следовательно, к деформации функции и тела неопределенности.

В РАЗ используются зондирующие колебания различной физической природы – акустические и электромагнитные, при этом рассеивающий объект, создаваемый

акустическим сигналом, не является точечным частотно-независимым отражателем и, следовательно, изменяет при рассеянии форму излучаемых электромагнитных колебаний. В соответствии с этим задача анализа зондирующих сигналов для радиоакустических систем зондирования атмосферы должна состоять в совместном изучении характеристик двух взаимосвязанных видов сигналов – электромагнитного и акустического.

Этап формирования методических основ науки

Следующий период развития науки происходит на более высоком – методическом (теоретическом) уровне. Для методического уровня характерны такие познавательные приёмы, как выдвижение гипотез, моделирование, абстрагирование, идеализация, обобщение, мысленный эксперимент и т.п. Методические (теоретические) основы науки составляют такие элементы.

Понятийный аппарат, включающий совокупность специфических понятий, категорий, терминов и определений данной науки;

Научно-методический аппарат, объединяющий совокупность разработанных в ходе развития науки и практики, принятых к широкому использованию (т.е. апробированных на практике, прошедших экспертизу специалистов, официально признанных и опубликованных) решений научных и практических задач, приводящих к получению научных результатов, обладающих вполне определенной гарантированной степенью достоверности. Наиболее совершенными формами организации знаний в рамках создания научно-методического

аппарата являются метод и теория; значительное место занимают также математические модели.

Теоретические данные науки (теоретические научные данные) – совокупность научных выводов и рекомендаций, полученных в результате применения методов и теорий данной науки в интересах непосредственной отдачи практике.

Научно-методический аппарат науки представляет собой арсенал средств описания, объяснения и предсказания явлений (процессов) соответствующей предметной области, объединяющий как средства теоретического исследования, базирующиеся на использовании методов тех или иных имеющихся или складывающихся теорий, так и средства экспериментального исследования, основывающиеся на применении методов и технических средств (устройств, установок и т.д.) экспериментирования.

Элементами научно-методического аппарата являются методы и постановки решения научных и практических задач, в том числе математические методы, модели и алгоритмы, а также их конкретные реализации в виде методик и средств (вычислительных, моделирующих, испытательных и др.) теоретического и экспериментального исследования. Термин «научно-методический аппарат» обычно не упоминается в энциклопедических изданиях. Но применяется в практике защиты и экспертизы диссертаций в связи с тем, что для соответствующей совокупности элементов требуется особое краткое название. Элементы научно-методического аппарата создаются с учетом вполне конкретных ограничений и допущений, что влияет на область их применимости. Сравнивая между собой теорию и метод, заметим, что теория в основном представляет собой описывающие, объясняющие и доказывающие знания, отвечающие главным образом на вопросы «каково то или иное: что, зачем и почему». Метод – это предписывающие знания, дающие ответ на вопросы: «каким образом: что, зачем и когда». Каждый метод воплощает соответствующую теорию (либо теории). Каждая теория в качестве своей важнейшей составной части включает ту или иную совокупность методов (объяснения, доказательства и др.)

Значительное место в формировании методических основ науки занимают также математические модели. Модель проще теории, но простота ее достигается ценой ограниченности: модель отражает не все, а только некоторые грани, только определенные свойства объекта моделирования. Если возникает необходимость в получении данных,

связанных с другой областью применения системы, нужна новая модель. Механизм получения сведений с использованием модели является более простым и «демократичным» по сравнению с методом формирования теории, он доступен более широкому кругу ученых и инженеров. В то же время модель является предтечей теории.

В настоящее время не существует строгих логических и математических методов построения и контроля моделей [35, 36]. Разработка модели – творческий неформальный акт, в котором реализуется опыт, догадка, интуиция, основанные на глубоком понимании особенностей изучаемых объектов и процессов. Таким образом, в области РАЗ при создании методических основ науки требовалась разработка адекватных конструктивных моделей, отображающих наиболее характерные свойства рассматриваемых рассеивающих объектов, предназначенных для использования при решении задач, связанных с исследованием зондирующих сигналов, построением алгоритмов обработки принимаемых колебаний. При построении теории зондирующих сигналов систем РАЗ целесообразно использовать методологический подход, применяемый в системотехнике [37, 38]. Суть данного подхода заключается в построении продуктивных конструктивных моделей изучаемых объектов и процессов, разработке методов исследования с их использованием и получении новых сведений об изучаемых объектах путем реализации этих методов на практике. Таким образом, формируется система взглядов, дающих целостное представление о закономерностях и связях, существующих в конкретной предметной области. При построении теории возможно использование и аксиоматического метода, основанного на совокупности постулатов и правил вывода (аксиоматики), позволяющих путем логической дедукции получать утверждения (теоремы) данной теории.

Новые возможности для анализа свойств зондирующих сигналов, понимания и правильной интерпретации накопленной в данной области научных данных, полученных как теоретическим, так и экспериментальным путем, появляются с разработкой модели информационного локационного канала, которая получила название – функция рассеяния [39]:

$$F(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r'-r)S^*(r')e^{jqr'} dr', \quad (1)$$

где $q = 2k_e - k_s$ – параметр расстройки условия Брэгга; $k_s = 2\pi f_a / c_a$ – волновое число для звука; $k_e = 2\pi f / c$ – волновое число электромагнитной волны; r – смещение сигналов по координате «дальность»; $E(2r'-r)$ – комплексная пространственная огибающая радиосигнала; $S(r')$ – комплексная пространственная огибающая акустического сигнала. Функция рассеяния содержит в себе информацию об огибающей рассеянных сигналов, их тонкой внутренней структуре при различных значениях расстройки условия Брэгга, и фазовой структуре колебания. В литературе [39] вводится понятие тело рассеяния, содержащее в себе информацию о пространственной протяженности рассеянного сигнала, о диапазоне возможных значений параметра Брэгга, в котором амплитуда рассеянной волны не уменьшается ниже некоторого заданного порогового значения, а система зондирования сохраняет работоспособность, и ряд других важных показателей. Для устранения систематической ошибки в процессе обработки необходимо обязательно учитывать изменение формы радиосигнала при его взаимодействии с акустическим колебанием. С использованием функции рассеяния может быть определена форма рассеянного на акустической посылке электромагнитного сигнала.

В рамках развития научно-методического аппарата данной предметной области сформирован понятийный аппарат – разработана совокупность специфических понятий и терминов: функция рассеяния, диаграмма рассеяния, радиоакустический векторный зондирующий сигнал, модель радиоакустического локационного информационного канала.

Ключевую роль в понимании особенностей процессов рассеяния и формирования отраженной волны в системах зондирования атмосферы играют понятия взаимного энергетического пространственного спектра и корреляционной функции сигналов по пространственной частоте [40], которые непосредственно связаны с моделью информационного канала. Взаимный энергетический пространственный спектр (в форме спектра временных частот) воспроизводится на выходе спектроанализатора радиоакустической системы, выполняющего анализ рассеянной волны.

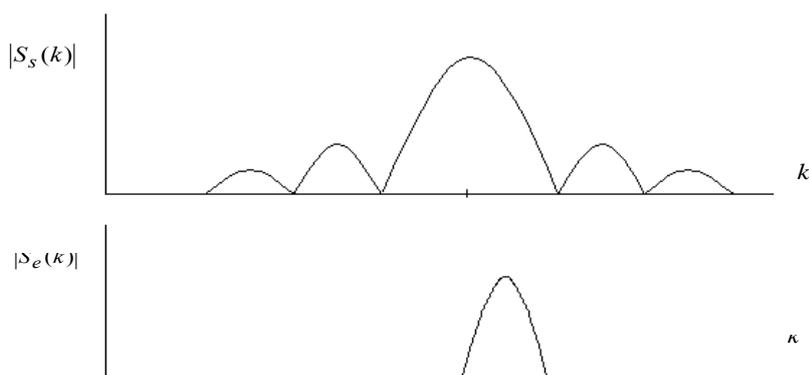
Заметим, что процесс рассеяния радиоволн на естественных и искусственно созданных неоднородностях среды теперь, с появлением соответствующих моделей, также может быть описан с использованием спектров волновых чисел звукового сигнала, рассеивающей неоднородности и радиосигнала. Введенные частотные представления существенно упрощают понимание и сам процесс описания формирования рассеянного сигнала. Действительно, выражение

$$F(r, q) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_E(k) S_S^*(2k + q) e^{-jrk} dk \quad (2)$$

содержит преобразование Фурье взаимного энергетического пространственного спектра зондирующих колебаний, определяет рассеянный сигнал. Как видно из (1), под интегралом находится величина, представляющая собой взаимный энергетический пространственный спектр процессов $E(r')$ и $S(r'/2)$:

$$S_y(k) = S_E(k) S_S^*(2k + q). \quad (3)$$

Если заменить параметр сдвига r на $r = ct$, то данное соотношение становится функцией времени t . При $r = 0$ в правой части (2) имеем корреляционный интеграл по пространственной частоте спектральных плотностей сигналов, совмещенных в пространстве. При любом другом фиксированном значении r правая часть (2) также представляет собой корреляционный интеграл по частоте k , но уже для сигналов, смещенных на расстояние r . Соотношение (2) отображает основную особенность рассеяния на такой неоднородности – его существенную частотную зависимость, которая проявляется как с энергетической, так и с информационной стороны. Изменение метеопараметров по трассе зондирования приводит к деформации (растяжению или сжатию) звуковой волны вдоль координаты r' , а следовательно, к перемещению $S_s(k)$ по оси частот k , вследствие чего максимумы пространственных спектров взаимодействующих сигналов не совпадают (см. рис. 3), а диапазон перекрытия спектров сужается. Амплитуда результирующего рассеянного сигнала при этом уменьшается. Представленные на рисунке спектры процессов $e(r')$ и $s(r')$ изображены один под другим, причем, ось пространственных частот звуковой волны сжата в два раза. Для наглядности используем не комплексные огибающие, а сигналы e, s и спектры S_e, S_s , содержащие частоты заполнения.



Если под воздействием метеопараметров спектр $S_s(k)$ смещается настолько, что спектры $S_e(k)$ и $S_s(2k)$ в пространстве волновых чисел не перекрываются вовсе, то такие сигналы в соответствии с (2) становятся ортогональными, т.е. акустический сигнал в этом случае полностью прозрачен для радиосигнала. В этом состоят энергетические особенности данного вида рассеяния.

Информационные или частотные особенности проявляются следующим образом. Если максимумы спектров $|S_e(k)|$ и $|S_s(2k)|$ не совпадают, т.е., как говорят, наблюдается расстройка по Брэггу, то максимум пространственного спектра $|S_y(k)|$ смещается дополнительно на величину Δk вследствие неравномерности и несимметричности функции $|S_s(2k)|$ в диапазоне перекрытия спектров. Это приводит к смещению максимума временного спектра рассеянного сигнала на величину $\Delta\omega = c\Delta k$ (где c – скорость распространения электромагнитных волн) и отличию частотного сдвига от чисто доплеровского. Можно рассматривать также смещение центра тяжести функции $|S_y(k)|$.

Следует отметить, что при переходе от пространственных к временным частотам даже очень малое смещение Δk ввиду большого значения c трансформируется в ощутимую разность $\Delta\omega$. $\Delta\omega$ представляет собой систематическую ошибку при определении скорости звука по доплеровскому сдвигу частоты, наличие которой приводит к существенным погрешностям в определении температуры. При определенных условиях пространственный и временной спектры рассеянного сигнала могут быть двумодовыми, что ранее отмечалось в работах по зондированию атмосферы.

Соотношения (2) и (3) отображают также изменения формы зондирующего радиосигнала при рассеянии. Увеличению длительности рассеянного радиосигнала вследствие конечной протяженности АВП, определяемому (2), соответствует сужение его пространственного спектра, как следует из (3). Представление процесса рассеяния в области пространственных спектров наглядно отображает также особенности взаимодействия различных видов радио и акустических зондирующих сигналов. Для иллюстрации рассуждений будем использовать рис.4. Если используются импульсный акустический и непрерывный электромагнитный сигналы, то спектр $S_e(k)$ стягивается в δ -функцию. Условие пространственного резонанса «выбирает» из совокупности бесконечных бегущих плоских волн, суперпозиция которых составляет акустический пакет, единственный спектральный компонент, отвечающий условию Брэгга. Если радиосигнал будет иметь конечную длительность (пространственную протяженность), а акустическое излучение – непрерывное, то на рисунке спектр $S_s(k)$ будет представлен δ -функцией. В этом случае звуковая волна с частотой k_s самостоятельно выделяет рассеиваемую пространственную гармонику, соответствующую условию брэгговского резонанса (если таковая окажется, т.е. если спектры перекрываются).

Функция рассеяния описывает также влияние горизонтального ветра на рассеянный сигнал. Как известно, горизонтальный ветер перемещает звуковой пакет в поперечном направлении и приводит к изменению угла θ между фронтами акустической и электромагнитной волн, а, следовательно, к изменению значения параметра q , который в общем случае представляется в виде $q = 2k_e - k_s \sin \theta$. Поэтому влияние среды, заключающееся в изменении величин k_s и θ , проявляется в конечном итоге как изменение параметра q . Тела рассеяния сигналов, таким образом, описывают и влияние горизонтального ветра на систему и рассеянный сигнал.

При использовании непрерывного электромагнитного излучения, получившего широкое распространение на практике, выражение для рассеянного сигнала приобретает следующий вид

$$Z(r) = \left| \int_0^{\infty} E(2r') S(r' - r) e^{jq(r')r'} dr' \right|. \quad (5)$$

В (5) функция $E(2r')$ радиоволны не содержит в аргументе члена сдвига, определяющего ее положение в пространстве, поскольку данная функция бесконечна и неизменна по пространству. Принимая во внимание, что для такого вида радиосигнала комплексная огибающая $E(r') = const$ примем $E(2r') = 1$, запишем

$$Z(r) = \left| \int_0^{\infty} S(r' - r) e^{jq(r')r'} dr' \right|. \quad (6)$$

Зависимость (6) от времени t станет очевидной, если параметр сдвига r представить в виде $r = c_s t$. На рис. 4, а, б представлены наиболее характерные виды огибающих сигнала, отраженного от звукового пакета в атмосфере, наблюдаемые при использовании непрерывного радиоизлучения.

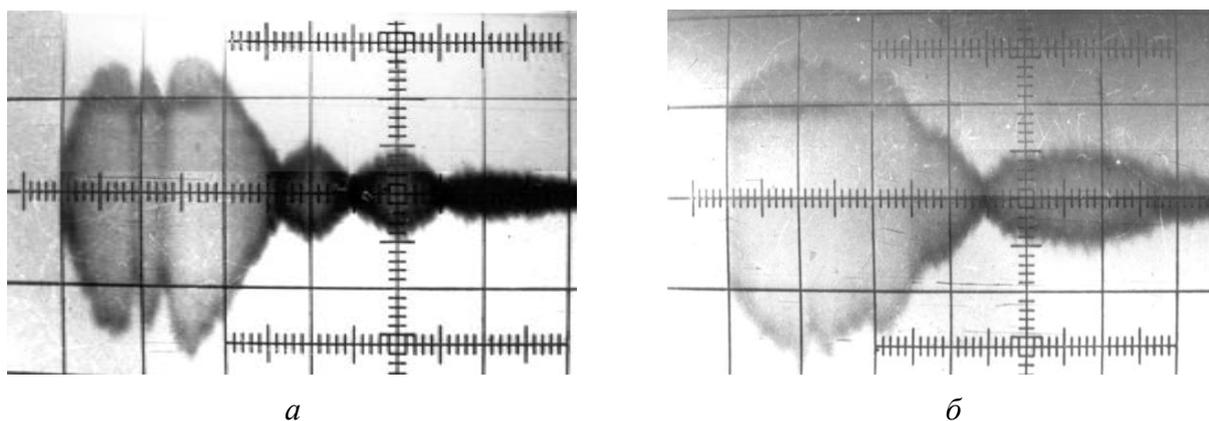


Рис. 4

На рис. 5 показана огибающая, полученная с использованием выражения (6) в результате компьютерного моделирования рассеяния. Задание при моделировании разнообразных профилей $q(r')$, отображающих различные состояния атмосферы, позволяет получать разнообразные виды огибающих, в том числе и подобные тем, которые представлены на рис. 6, что свидетельствует об адекватности рассматриваемой модели.

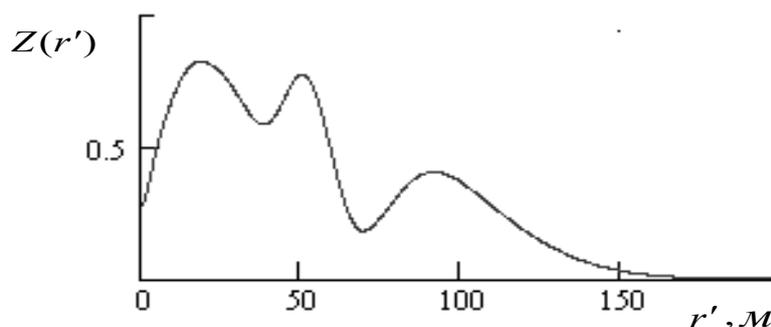


Рис. 5

Таким образом, корреляционная модель адекватно описывает процесс формирования рассеянного на звуке радиосигнала, в том числе и для непрерывного монохроматического радиоизлучения. Это позволяет, в частности, осуществлять на практике интерпретацию огибающих получаемых сигналов, которые регистрируются и фотографируются на протяжении всего времени существования метода РАЗ, но, ввиду отсутствия четкого механизма их формирования, представленного в достаточно простом аналитическом виде, не используются при обработке. Сопоставление разработанных моделей рассеяния с известными ранее из теории и практики результатами, показало их адекватность. Созданные модели и методы исследования обеспечивают ясную физическую трактовку особенностей взаимодействия различных видов радио и акустического сигналов, специфических погрешностей оценивания температуры системами РАЗ для различных видов зондирующих колебаний, предоставляют возможность производить необходимые инженерные расчеты.

С другой стороны, выражение (2) отображает закономерность, выявленную в формировании рассеянного на звуке радиосигнала, которая представляет собой взаимную корреляционную функцию по продольной пространственной координате взаимодействующих акустического и электромагнитного колебаний. Закономерность вытекает из известных соотношений, полученных теоретически и подтверждается многочисленными результатами экспериментов.

Об особенностях использования аксиоматического подхода при построении прикладных теорий хорошо сказано в [41]. «Если в некоторой группе доступных наблюдению явлений обнаруживается определенная закономерность, то можно попытаться построить математическую теорию этих явлений. Такую теорию можно считать математической моделью запаса эмпирических фактов – данных, полученных наблюдениями. В качестве отправной точки мы выбираем некоторые из наиболее существенных и наиболее простых черт этой закономерности, которая обнаружена в полученных данных. Эти признаки мы выражаем в упрощенной и идеализированной форме как математические предложения – аксиомы, которые мы кладем в основу нашей теории. Из аксиом получаются различные теоремы с помощью чистой логической дедукции, без каких-либо ссылок на опыт. Логически непротиворечивая система утверждений, построенная на математической основе, образует нашу математическую теорию ...». Дедуктивным путем, характерным для аксиоматического подхода, доказаны основополагающие свойства введенной функции рассеяния, которые, по сути, представляют собой свойства рассеянных сигналов. Разработаны методы исследования свойств зондирующих акустических и электромагнитных сигналов, основанные на представлении функции рассеяния в различных математических формах и графически в виде поверхностей.

С помощью разработанных методов выполнен значительный объем теоретических исследований по изучению свойств радиоакустических сигналов, как простых, так и сложных [24, 40 и др.]. В работе [42], например, с помощью метода компьютерного моделирования проанализированы, какие изменения претерпевают тела рассеяния изучаемых сигналов при введении в звуковой сигнал линейной частотной модуляции при постепенном увеличении значения девиации пространственной частоты. Основной лепесток тела рассеяния «разворачивается», происходит уширение тела вдоль оси q и расширяется диапазон волновых чисел взаимодействия зондирующих сигналов, но с другой стороны, это сопровождается уменьшением длительности рассеянных радиосигналов. Физической причиной уменьшения длительности сигнала является уменьшение протяженности пространственной области эффективного взаимодействия акустического и электромагнитного колебаний вследствие наличия модуляции параметров по пространству.

Отметим также, что в радиоакустических и акустических системах, как и в радиолокационных, не существует некоторого оптимального сигнала (или сигналов) для всего многообразия систем и условий их функционирования. Даже в классической радиолокации при существующей развитой теории зондирующих сигналов все еще содержит

в себе элемент истины утверждение Вудворда [43], что «основной вопрос, заключающийся в том, какой же радиолокационный сигнал следует передавать, остается по существу без ответа», если отсутствует необходимая информация о радиолокационной и помеховой обстановке. В свете созданной теории зондирующих сигналов очевидное толкование получили известные ранее научные факты, к примеру, несимметричность спектров электромагнитного и акустического зондирующих сигналов. Были выявлены новые, не замеченные ранее явления. Например, при процессе рассеяния происходит сжатие сигнала, примерно то же самое происходит при обработке в оптимальном фильтре. Стали очевидными новые задачи и перспективы развития теории, рассматриваемых систем в целом.

Методика анализа и выбора зондирующих сигналов рассматриваемых систем должна не только отвечать на вопрос, какой же сигнал является наилучшим или наиболее приемлемым для определенных фиксированных внешних условий, но также и на вопрос, какими должны быть сигналы при изменяющихся (в заданных пределах) условиях, например вдоль трассы зондирования. Модели, адекватно описывающие процесс и особенности рассеяния радиоволны на звуковой посылке, позволили синтезировать систему РАЗ на основе корреляционной обработки [44]. Особенностью системы является то, что в ней для измерения скорости звука формируются оценки максимального правдоподобия энергетического параметра принимаемого сигнала. Использование функции рассеяния позволяет описывать энергетические особенности акустического и электромагнитного сигналов при их произвольных видах методом моделирования.

Заключение

В результате анализа научных и практических результатов, имеющихся в рассматриваемой предметной области, выделены этапы и стадии развития метода и систем РАЗ. Показано, что первый этап развития данной области был эмпирическим; он характеризовался использованием количественных методов, получением и накоплением значительного числа экспериментальных результатов, далеко не всегда получавших соответствующую трактовку и интерпретацию. Следующим этапом развития науки в данной области является методический (теоретический) уровень, характеризующийся созданием адекватных конструктивных моделей наблюдаемых процессов с использованием ранее накопленной на эмпирическом уровне информации. Значительным достижением ученых на данном этапе является создание аксиоматическим путем теории векторных зондирующих радиоакустических сигналов. Для формирования и развития целостного представления о закономерностях и связях, существующих в данной предметной области необходимо строить и совершенствовать конструктивные модели изучаемых объектов и процессов, разработать методы исследования с их использованием и получать новые сведения об изучаемых объектах путем реализации этих методов на практике. Целесообразно также развивать теорию систем и зондирующих сигналов, применяя полученные с ее помощью результаты для улучшения качественных характеристик систем зондирования.

Список литературы: 1. *Степин В. С.* Философия науки. Общие проблемы : учебник для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук. – М. : Гардарики, 2006. – 384 с. 2. *Atlas D.* Indirect probing techniques // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 1962. – Vol. 43, № 9. – P. 457 – 467. 3. *Marschall J.M., Peterson A.M., Barnes A.A.* Combined radar acoustic sounding system // *Appl. Opt.* – 1972. – Vol.2, №1. – P. 108 – 112. 4. *Бабкин С.И., В.И. Куценко, Ю.А. Похомов* и др. Система радиоакустического зондирования атмосферы сантиметрового диапазона волн // Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы, тезисы докладов. – 1976. – Т.02 № 3. – С. 143-146. 5. *Бабкин С.И., Милосердова Г.Н., Орлов М.Ю., Похомов Ю.И., Прошкин Е.Г., Ульянов Ю.Н., Юрчак Б.С.* Определение температуры, скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы методом радиоакустического зондирования // *Метрология и гидрология.* – ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1980. – №8. – С. 36-45. 6. *Bonino G., Elisei G., Marzorati A., Trivero P.* Results on planetary boundary layer sounding

by automatic RASS // Atmos. Res. – 1986. – Vol. 20, № 4. – P. 309 – 316. 7. *Kartashov V.M., Korytsev I.V.* Optimal algorithms of signal processing in radio acoustic systems // Proc. 9 Int. Symp. On Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans. – Vienna. – 1998. P. 107 – 110. 8. *Калистратова М.А.* Применение акустической и радиоакустической локации в атмосферных исследованиях // Материалы семинара «Исследование пограничного слоя атмосферы над сушей и океаном акустическими методами». – М. : ИФА АН СССР, 1990. – С. 7 – 14. 9. *Gorsdorf U., Lehmann V.* Enhanced accuracy of RASS – measured temperatures due to an improved range correction // J. Atmos. Ocean Tech. – 2000. – Vol. 17, №4. – P. 406 – 416. 10. *Азизян Г.В., Бовишеверов В.М., Горелик А.Г.* и др. Опыт измерений температурных профилей в нижней тропосфере методом радиоакустического зондирования // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1981. – Т. 17, № 2. – С. 153 – 159. 11. *Бабкин С.И., Максимова Н.Г., Панченко А.Ю.* и др. Измерение влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы // Труды 9-го Всесоюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Томск : ТФСО А СССР, 1986. – Ч. 2. – С. 145 – 148. 12. *Карташов В.М., Алехин В.И.* Алгоритм управления частотами зондирующих сигналов в системах радиоакустического зондирования атмосферы / Харьк. ин-т радиоэлектроники. – Киев, 1994. – 11 с. Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 06.07.94 г., № 1729 – Ук94. 13. *Прошкин Е.Г.* Радиоакустическое зондирование в системе контроля загрязнения атмосферного воздуха / Харьк. ин-т радиоэлектроники. – Киев, 1987. – 115 с. Деп. в УкрНИИТИ 05.05.87 г., № 1382. – Ук87. 14. *Дистанционные методы* и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Б.Л. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. – Х. : ХТУРЭ ; Бизнес Информ, 2002. – 426 с. 15. *Gorsdorf U., Petenko I.V.* Some results of experimental investigation of the RASS – measured temperature accuracy // Proc. 9 Int. Symp. On Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans. – Vienna, 1998. P. 160 – 163. 16. *Peterman K.R., Frederick G.L., Zeigler G.S., Millican R.* The development of mobile Radar/RASS atmospheric profiler technology // Extended abstracts of COST – 76 Profiler Workshop. Engelberg (Switzerland), 1997. – P. 132 – 134. 17. *Petenko I.V.* Improved estimation of RASS-measured temperature corrections // Proc. 9 Int. Symp. On Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans. Vienna, 1998. – P. 154 – 159. 18. *Vogt S.* Advances in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies // Proc. 8 Int. Symp. On Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans. – Moscow, 1996. P. 37 – 50. 19. *Маркова Т.И.* О нелинейном поглощении звука в задачах акустического и радиоакустического зондирования атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1980. – Т. 16, №2. – С. 195 – 197. 20. *Андреанов В.А., Кальцын В.А.* Применение нелинейных эффектов при выборе акустической антенной системы для зондирования атмосферы // Радиотехника и электроника. -1981. – № 10. – С. 2209 – 2211. 21. *Данилов С.Д., Калистратова М.А.* Оценки нелинейного ослабления звука при акустическом и радиоакустическом зондировании атмосферы // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1987. – Т. 23, №9. – С. 997 – 999. 22. *Калистратова М.А., Кон А.И.* Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М. : Наука, 1985. – 200 с. 23. *Карташов В.М.* Некоторые вопросы проектирования и оптимизации систем радиоакустического зондирования атмосферы / Харьк. Ин-т радиоэлектроники. – Киев, 1994. – 9с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 06.07.94 г., № 1730 – Ук94. 24. *Карташов В.М.* Некоторые результаты экспериментальных исследований характеристик радиосигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». 2002. – С. 48 – 51. 25. *Многопозиционные радиотехнические системы* / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков ; Под ред. В.В. Цветнова. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с. 26. *Гуткин Л. С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств. – М. : Радио и связь, 1986. – 282 с. 27. *Березин Л.В., Вейцель В.А.* Теория и проектирование радиосистем. – М. : Сов. радио, 1977. – 448 с. 28. *Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н.* Статистическая теория измерительных радиосистем. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с. 29. *Фалькович С.Е., Понамарев В.И., Шкварко Ю.В.* Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием. – М. : Радио и связь, 1989. – 297 с. 30. *Коростелев А.А.* Пространственно-временная теория радиосистем : учеб. пособие. – М. : Радио и связь, 1987. – 320 с. 31. *Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория.* Справочник ; под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. – 825 с. 32. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы ; пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1973. – 560 с. 33. *Теоретические основы радиолокации* ; под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с. 34. *Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М.* Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. – М. : Сов. радио, 1973. – 312 с. 35. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. – М. : Наука, 1971. – 207 с. 36. *Грешилов А.А.* Анализ и синтез стохастических систем: Параметрические модели и конфлюэнтный анализ. – М. : Радио и связь, 1990. – 319 с. 37. *Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Б.С.* Введение в радиолокационную системотехнику. – М. : Сов. радио,

1971. – 306 с. 38. *Дружинин В.В., Конторов Д.С.* Системотехника. – М. : Радио и связь, 1985. – 202 с. 39. *Карташов В.М.* Модели и методы обработки сигналов систем радиоакустического и акустического зондирования атмосферы: Монография. Харьков: 2011. 230 с. 40. *Карташов В.М.* Анализ зондирующих радиоакустических сигналов с использованием тел рассеяния // Радиотехника. – 2002. – №124. С. 95 – 99. 41. *Математические* методы статистики ; пер. с англ. ; под ред. А.Н. Колмогорова. – М. : ИЛ, 1948. – 632 с. 42. *Карташов В.М., Куля Д.Н., Пащенко С.В., Кушнир М.В.* Особенности рассеяния радиоволн на сложных акустических сигналах при радиоакустическом зондировании атмосферы // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/9(60). – С. 64 – 67. 43. *Вудворд Ф.М.* Теория вероятностей и теория информации с применениями в радиолокации ; пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1955. – 192 с. 44. *Карташов В.М., Пащенко С.В.* Алгоритм формирования оценок максимального правдоподобия параметров радиосигнала, рассеянного акустическим волновым пакетом // Радиотехника. – 2011. – №164. – С. 35-40.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.04.2014