

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОЙ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ В МНОГОПОЗИЦИОННОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕГО ПРОСТРАНСТВА*

**В.М. Кутузов, С.П. Калениченко, А.Г. Попов, В.И. Веремьев, А.А. Коновалов,
А.В. Бархатов, В.Н. Михайлов**

Аннотация

Рассматриваются основные принципы построения системы совместной траекторной обработки многопозиционного радиолокационного комплекса мониторинга окружающего пространства. Проанализированы преимущества предложенного способа построения РЛК по сравнению комплексами иной архитектуры. Приведены результаты экспериментальных исследований, математического и имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенных решений.

DESIGN PRINCIPLES OF JOINT TRACKING SYSTEM AT THE MULTI-SITE RADAR COMPLEX FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

V.M. Kutuzov, S.P. Kalenitchenko, A.G. Popov, V.I. Veremjev, A.A. Konovalov, A.V. Barkhatov, V.N. Mikhaylov

Abstract

Basic principles of joint tracking system design for the multi-site environmental monitoring radar complex are considered. Advantages of proposed scheme in comparison with another architectures are analysed. Experimental and simulation results which confirm an effectiveness of proposed solutions are given.

В настоящее время радиолокационные методы широко применяются для решения задач исследования природных сред, в частности для дистанционного экологического мониторинга окружающего пространства. РЛС используются для слежения за состоянием воздушных и водных пространств, для обнаружения разливов нефти, атмосферных техногенных выбросов, грозовых и грозоопасных облаков и т. д. Однако далеко не все задачи мониторинга можно решить при помощи только одной РЛС. Например, сформировать требуемую зону видимости при заданных точностных параметрах или обеспечить получение информации об объекте, которая может быть предоставлена только средствами разных частотных диапазонов. Появляется идея объединить несколько РЛС так, чтобы их совокупность уже могла бы обеспечить требуемое количество и качество информации о наблюдаемых объектах, что делает актуальной разработку и внедрение пространственно-разнесенных и многодиапазонных радиолокационных систем и комплексов.

В [1] предложен вариант концепции построения системы радиолокационного контроля окружающей среды. В этой системе объединяется информация, поступающая от доплеровских метеорологических РЛС, РЛС ПВО, специализированных РЛС мониторинга окружающего пространства, пассивных радиотехнических средств. В [2] описаны принципы построения многофункционального радиолокационного комплекса

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (государственный контракт № П521от 14.05.2010).

мониторинга чрезвычайных ситуаций и прогнозирования состояния морских акваторий, также использующем информацию от миллиметровых, сантиметровых и декаметровых РЛС. В этих и многих других ситуациях возникает необходимость объединения данных об одном и том же объекте, получаемых разными датчиками. В этой статье, которая является развитием идей, изложенных в [2], рассматриваются вопросы объединения параметров движения радиолокационных целей, необходимого, когда несколько датчиков осуществляют совместное наблюдение за подвижными объектами, находящимися в пределах пересекающихся зон видимости. Такое объединение достигается в ходе совместной траекторной обработки.

Предлагаемый способ построения многодиапазонного радиолокационного комплекса [2,3] базируется на идее объединения в его составе разнородных РЛС, каждая из которых, решая поставленные перед ней задачи, предоставляет информацию об обнаруженных ею целях в специализированный центр, где осуществляется совместная обработка. Для объединения в составе комплекса отбираются независимо работающие РЛС, имеющие перекрывающиеся зоны видимости. Каждая РЛС производит обнаружение целей, измерение их координат, формирование отметки и передачу ее в центр обработки. Под отметкой понимается вся совокупность данных о цели, в нее входят: вектор измеренных параметров цели (дальность, азимут, угол места, радиальная скорость), ошибки измерения или корреляционная матрица ошибок, время обнаружения цели. Концепция построения комплекса допускает использование данных и от мобильных РЛС, при этом в состав отметки включаются координаты носителя РЛС в момент обнаружения цели.

При объединении результатов обнаружения целей в независимо работающих РЛС возможен выбор между объединением отметок и траекторий (трасс). В первом случае в центр обработки передается информация обо всех обнаруженных целях, во втором – только о целях, траектории которых обнаружены и взяты на сопровождение в самой РЛС. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки.

При объединении траекторий снижаются требования к пропускной способности линий связи между РЛС и центром обработки за счет фильтрации ложных отметок; снижается нагрузка на вычислительные устройства центра обработки, поскольку часть обработки осуществляется самой РЛС; имеется возможность адаптации алгоритмов траекторной обработки к обстановке, складывающейся в зоне видимости каждой РЛС.

При объединении отметок информации в центр обработки поступает больше, и начинает приходить она туда раньше – еще до того, как РЛС обнаружит траекторию, что способствует более раннему обнаружению новой траектории. За счет большего числа информации при объединении отметок увеличивается средняя продолжительность сопровождения траектории, уменьшается вероятность срыва сопровождения, повышается точность сопровождения. Наиболее заметно преимущество объединения отметок перед объединением траекторий проявляется в зоне неуверенного обнаружения, где в отдельной РЛС не удастся завязать траекторию вследствие недостаточного числа отметок, а в комплексе вероятность обнаружения траектории по отметкам от нескольких РЛС будет существенно выше. Отметим также необходимость создания только одной системы траекторной обработки, что облегчает ее наладку и эксплуатацию, позволяет оперативно вносить изменения при необходимости решения комплексом новых задач, например, сопровождения целей других типов. Для реализации в МДРК был выбран вариант объединения на уровне отметок.

Непосредственно после обнаружения и формирования каждая отметка по линии связи поступает в центр обработки. Эта обработка включает в себя преобразование координат, отождествление отметок с сопровождаемыми траекториями и

сопровождение траекторий, состоящее из обнаружения траектории, фильтрации ее параметров и сброса траектории с сопровождения (см. рис. 1).

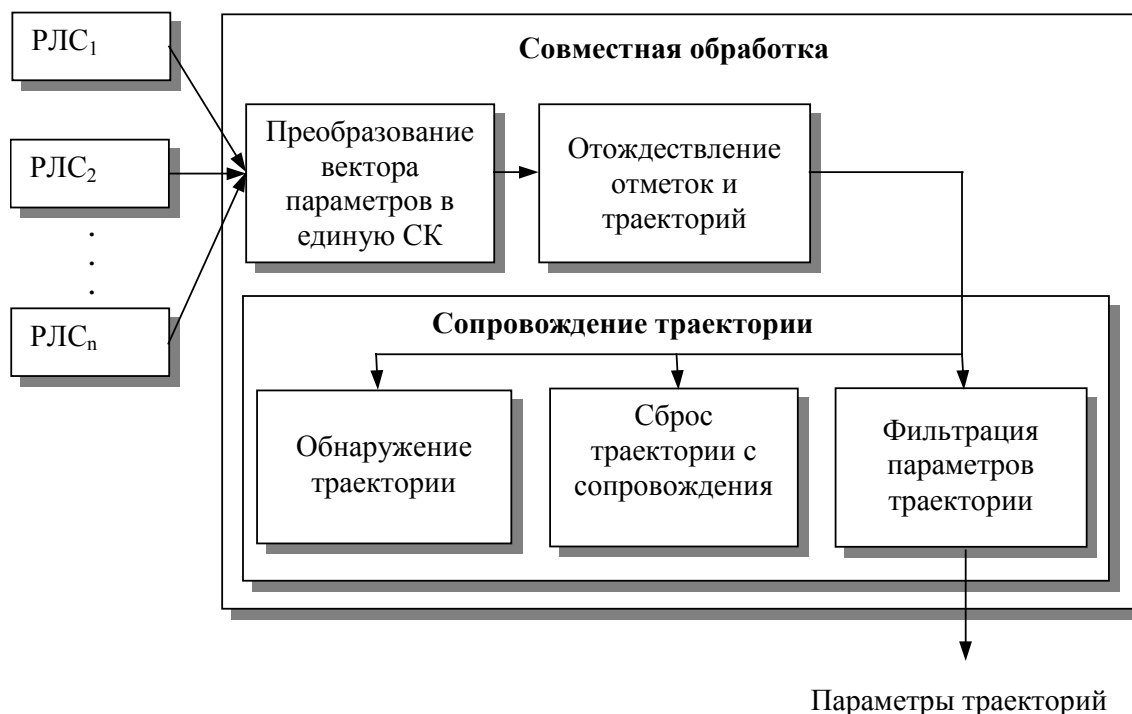


Рис. 1

При разработке системы траекторной обработки комплекса следует определить набор целей, которые он должен обнаруживать и сопровождать, и выделить основные особенности их перемещения в пространстве. На основе этих данных разрабатывается модель движения цели, которая используется алгоритмами траекторного сопровождения. Сопровождаемые комплексом экологического мониторинга цели по характеру движения можно разделить на динамические и кинематические (движущиеся под воздействием внешних условий – ветра, течения), маневрирующие и не маневрирующие, одиночные и групповые; по числу занимаемых элементов разрешения – на точечные и пространственно–распределенные. Кроме того, необходимо учитывать различные помехи, активные и пассивные, преднамеренные и непреднамеренные, приводящие к появлению на входе алгоритма траекторной обработки ложных отметок.

В ходе совместной обработки радиолокационной информации необходимо приведение измерений к единому отсчету в пространстве. Это достигается путем преобразования векторов измеренных параметров цели и их корреляционных матриц из локальных систем координат, связанных с отдельными РЛС, в базовую систему координат, связанную с центром объединения. В качестве базовой предпочтительно использовать прямоугольную систему координат, ее основное преимущество состоит в том, что равномерное прямолинейное движение цели описывается линейными дифференциальными или разностными уравнениями первого порядка, в то время как в других системах координат уравнения движения нелинейны, что усложняет обработку и может привести к дополнительным ошибкам [4].

Для успешного пространственного совмещения наблюдений в комплексе локальные оценки положения цели, получаемые отдельными РЛС, должны быть несмещенными. Наличие смещения – постоянного, вызванного систематическими

погрешностями измерений пространственных координат цели, неточностью измерения местоположения РЛС, рассогласованием локальных временных шкал; либо изменяющегося во времени, обусловленного различными нестабильностями датчиков, – приводит к ошибкам совмещения, которые выражаются в снижении точности совместного оценивания положения цели, уменьшении вероятности правильного отождествления, возникновению эффекта дублирования траекторий истинной цели. При проектировании комплексов и систем совместной обработки следует принимать меры к устранению или существенному снижению ошибок совмещения, что может достигаться как организационными мероприятиями (юстировка), так и алгоритмически (оценка и устранение остаточных погрешностей на этапе совместной траекторной обработки). Среди подобных алгоритмов можно отметить дополненный и двухэтапный фильтры Калмана.

Метод дополненного фильтра Калмана заключается в том, что в оцениваемый вектор состояния вводятся дополнительные величины – искомые систематические погрешности. Однако этот метод требует слишком больших вычислительных затрат, поэтому на практике он обычно заменяется так называемым двухэтапным фильтром Калмана. В этом алгоритме на первом этапе осуществляется оценка вектора состояния цели в предположении об отсутствии систематических погрешностей, на втором – на основе полученной оценки и измеренного значения оцениваются ошибки совмещения, которые затем используются для коррекции выходной оценки основного фильтра. Оценка ошибок совмещения производится для каждой из РЛС отдельно. Замена одного фильтра двумя меньшей размерности значительно снижает требуемые вычислительные затраты. Этот метод, на данный момент являющийся основным способом устранения систематических погрешностей, имеет большое число модификаций, в том числе и для асинхронных датчиков [5].

Обнаружение новой траектории начинается после обнаружения отметки, не отождествленной ни с одной из сопровождаемых траекторий. Обычно оно производится в два этапа: завязка траектории и подтверждение завязанной траектории. Завязка происходит после попадания отметки на одном или нескольких последовательных обзорах в строб первичного захвата (критерий « $2/N$ »).

В настоящее время самым распространенным алгоритмом подтверждения траектории в однопозиционных РЛС является метод серийных испытаний, в котором фиксируется факт попадания отметки цели в строб сопровождения не менее L раз за M последовательных обзоров (критерий « L/M »). В многопозиционных комплексах вместо числа обзоров фиксируется время завязки $T_{зав}$ и время подтверждения $T_{подт}$, в течение которых будет ожидаться заданное количество отметок от данной цели. Тогда критерии завязки и подтверждения записываются как « $2/T_{зав} + L/T_{подт}$ ».

Метод серийных испытаний получил широкое распространение по причине своей простоты, однако он имеет ряд недостатков, главным из которых является трудность выбора значений N , L и M ($T_{зав}$, L и $T_{подт}$ в многопозиционном варианте). Дело в том, что отсутствуют общие выражения, связывающие эти значения с характеристиками метода (вероятности правильного и ложного обнаружения, время до принятия решений), поэтому для каждой комбинации критериев нужно проводить полный его анализ [4]. Более предпочтительным является использование многопозиционного алгоритма обнаружения траектории на основе статистического последовательного анализа. Помимо того, что последовательный метод обеспечивает минимальное время анализа среди всех алгоритмов с одинаковыми ошибками первого и второго рода, он удобен для реализации в многопозиционном комплексе, поскольку основные выражения (для отношения правдоподобия и порогов) совпадают с таковыми в однопозиционном варианте. Главным условием его применимости в асинхронном

многопозиционном комплексе является необходимость заранее знать время появления отметок от всех РЛС, с тем чтобы зафиксировать возможный пропуск обнаружения и произвести декремент отношения правдоподобия.

Основным критерием при принятии решения о сбросе траектории является появление некоторой пороговой серии пропусков отметок в стробах сопровождения. В однопозиционных РЛС обычно используется критерий, в соответствии с которым сброс траектории с сопровождения производится при появлении пороговой серии из K пропусков отметок подряд. В многопозиционном комплексе следует перейти к временному критерию сброса «отсутствие отметок от цели в течении времени $T_{сбр}$ ».

Поскольку траекторное сопровождение целей осуществляется, как правило, в присутствии соседних целей и ложных отметок, образующихся в результате наличия помех от подстилающей поверхности, ложных превышений порога в системе обнаружения и т.д., необходимо предварительное отождествление (идентификация) новых отметок с сопровождаемыми траекториями. Процесс отождествления включает в себя два этапа, на первом из которых (стробирование) результаты измерений сопоставляются со всеми экстраполируемыми траекториями. Если с некоторой траекторией в результате стробирования оказалась отождествлена единственная отметка, не попавшая в стробы других траекторий, она присваивается этой траектории, и этап отождествления на этом заканчивается. В случае, если в строб сопровождения траектории попало несколько отметок, или одна отметка попала в стробы сопровождения двух и более траекторий, на втором этапе производится точное отождествление. В настоящее время наибольшее распространение получили алгоритмы вероятностной идентификации данных (PDA – Probabilistic Data Association) для единичной цели и совместной вероятностной идентификации данных (JPDA – Joint PDA) – для множественных целей [6], которые являются на сегодняшний день наиболее привлекательными с точки зрения соотношения качества и требований к вычислительным средствам.

Алгоритм фильтрации должен обеспечивать траекторное сопровождение цели, движущейся согласно принятой модели движения. При линейном наблюдении и известной динамике цели, а также гауссовском шуме движения и наблюдения, оптимальным (по критерию МСКО) устройством оценки параметров траектории является фильтр Калмана. Однако как только цель изменяет динамику, например, выполняет маневр, оценка калмановского фильтра может начать расходиться, что снижает точность и в конечном итоге может привести к сбросу сопровождения. Такое расхождение обусловлено некорректным представлением фильтром динамики цели, следовательно, необходимо принять меры для адекватного отображения фильтром реального движения цели. Когда тип маневра известен, а задача оценивания сводится к определению его интенсивности, используются алгоритмы с обнаружителем маневра, изменяющие (адаптирующие) параметры или структуру траекторного фильтра в зависимости от наличия или отсутствия маневра. Примерами таких алгоритмов являются: изменение коэффициента усиления фильтра Калмана с целью уменьшения влияния предыдущих измерений, динамическое оценивание вектора ускорений (входное оценивание), изменение размерности вектора оцениваемых фильтром параметров (увеличение при начале маневра, уменьшение при его окончании) [7]. В ситуациях, когда маневр цели является неизвестным, но принадлежащим некоторому конечному множеству возможных вариантов, используют многомодельные алгоритмы. В них предусмотрены набор моделей–кандидатов на соответствие характеру движения цели в данный момент и банк элементарных фильтров, соответствующих каждой из этих моделей; итоговая оценка вычисляется на основе использования результатов работы всех элементарных фильтров. Наибольшее распространение среди

многомодельных алгоритмов сопровождения маневрирующих целей благодаря сочетанию высокой точности и сравнительно низким требованиям к вычислительным ресурсам получил интерактивный многомодельный алгоритм ИММ [6].

Оценка координат и параметров движения пространственно-распределенной цели (ПРЦ) в принципе осуществляется по той же методике, что и точечной, но при этом появляется некоторая специфика. Во-первых, для траекторной обработки необходимо определить центр ПРЦ, которая занимает несколько пространственных ячеек разрешения. В качестве такой оценки используют координаты центра, вычисляемые на основе информации об интенсивности сигналов в элементарных ячейках разрешения и априорных статистических характеристиках сигнала и шума. Фильтрация параметров движения производится стандартными методами траекторного сопровождения. Во-вторых, наряду с параметрами движения для ПРЦ имеется возможность оценки параметров формы, в качестве которых может выступать контур изображения цели, или, в более простых ситуациях, линейные размеры цели, например, диаметр пятна нефти. Для фильтрации параметра формы стандартными траекторными фильтрами необходимо знать точную модель его изменения во времени, иначе следует использовать робастные либо адаптивные алгоритмы. Например, при сопровождении ПРЦ типа нефтяного пятна параметры выброса (тип нефти, объем, точное время начала) являются неизвестными, для фильтрации диаметра можно использовать экспоненциальный фильтр Калмана, в котором предыдущие данные подвергаются искусственному «старению», в результате чего их вес при формировании оценки снижается по сравнению с более свежими данными.

При сопровождении кинематических целей типа атмосферных неоднородностей или разливов нефти, движущихся под влиянием некоторых детерминированных (т. е. не случайных) воздействий, входное воздействие, учитываемое в уравнении состояния, будет иметь две составляющие – детерминированную и случайную. Для определения детерминированной составляющей можно воспользоваться измерениями дополнительных датчиков – направления и силы ветра, полей течений и пр. При отсутствии таких измерений вектор детерминированных воздействий можно либо учитывать посредством увеличения корреляционной матрицы случайной составляющей, либо оценивать в ходе траекторного сопровождения, для чего используются адаптивные методы, аналогичные обнаружению маневра цели.

Работоспособность предложенной концепции была подтверждена экспериментально, а также при помощи статистического имитационного моделирования.

Количественный анализ характеристик совместной обработки проводился с использованием статистического компьютерного моделирования. Рассматривался комплекс, состоящий из четырех РЛС сантиметрового диапазона (СКО измерения дальности 250 м, азимута $0,5^\circ$, вероятность обнаружения цели с ЭПР не более 10 м^2 на высоте 10 км и дальности 250 км 0,5), расположенных по сторонам квадрата со стороной 50 км, и одной РЛС метрового диапазона (600 м, 1° , 0,8), находящейся в центре квадрата. Для сравнения использовалась система траекторной обработки в комплексе с объединением трассовой информации. Слежение проводилось за точечной целью (легкомоторный самолет).

Наиболее существенное улучшение наблюдается для параметров, характеризующих процесс обнаружения истинной траектории: среднее время обнаружения траектории уменьшается в 3,7 раза, увеличение вероятности обнаружения истинной траектории достигает 35%. Улучшение точности оценивания положения цели при равномерном и прямолинейном движении достигает 30% (в стационарном режиме траекторного фильтра – 15%). Увеличение средней продолжительности траектории

составляет 10%, причем более существенным представляется то, что она принимает значения, близкие к единице. Единственной ухудшающейся характеристикой траекторной обработки является максимальное количество обнаружений ложных траекторий в единицу времени. Тем не менее это не является препятствием для нормального функционирования системы траекторного сопровождения. Например, при критерии обнаружения « $2/12c+1/12c$ » и вероятности ложной тревоги $F=10^{-4}$ во всех РЛС комплекса в среднем будет обнаруживаться одна ложная траектория за 15 минут.

В натурном эксперименте участвовали две РЛС сантиметрового диапазона (3 и 10 см) и РЛС метрового диапазона [8]. Оценивалась точность траекторного сопровождения в комплексе с объединением отметок и в одиночных РЛС при сопровождении легкомоторного самолета. Показано, что выигрыш в точности определения местоположения цели в горизонтальной плоскости не менее 10% относительно лучшей РЛС, увеличение средней продолжительности траектории для разных экспериментов составило 5-25%.

Таким образом, метод объединения отметок обеспечивает улучшение большинства характеристик траекторной обработки, а ухудшение всего одной из них не оказывает существенного влияния на функционирование комплекса.

Дальнейшая работа по развитию концепции построения комплекса радиолокационного мониторинга будет заключаться в разработке алгоритмов объединения признаков целей, не относящихся к параметрам движения, и совершенствованию алгоритмов совместной траекторной обработки.

Список литературы

1. В.И. Веремьев, А.А. Коновалов. Радиолокационные методы обнаружения и оценки параметров атмосферных неоднородностей техногенного происхождения. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. – 132 с.
2. Веремьев В.И., Коновалов А.А., Михайлов В.Н., Попов А.Г. Принципы построения многофункциональных радиолокационных комплексов мониторинга ЧС и прогнозирования состояния акваторий северных морей // XVI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 13-15 апреля 2010 г. – Том 3. – С. 1744-1751.
3. Пат. РФ №102267 / Бархатов А.В., Веремьев В.И., Калениченко С.П., Ковалев Д.А., Коновалов А.А., Михайлов В.Н., Попов А.Г. Радиолокационный комплекс мониторинга воздушного пространства и морских акваторий; Оpubл. 20.02.11. Бюл. №5.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К: КВЦ, 2000. – 428 с.
5. Yifeng Zhou. A Kalman Filter Based Registration Approach for Multiple Asynchronous Sensors. Technical Report DRDC Ottawa TR 2003-20, Defence R&D Canada. 2003. – 48 p.
6. Y. Bar-Shalom and X.R. Li. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. – Storrs, CT, YBS Publishing, 1995. – 620 p.
7. X. R. Li and V. P. Jilkov. A survey of maneuvering target tracking - part IV: Decision-Based Methods // Proc. 2002 SPIE Conf. Signal and Data Processing of Small Targets, Orlando, FL, USA, April 2002. – p. 4728-4760.
8. Multi-band and multi-position radar complex for airspace monitoring / V. M. Kutuzov, S. P. Kalenitchenko, A. A. Konovalov et al. // Proceedings of St.Petersburg IEEE Chapters. Year 2001. SPb.: SPb ETU “LETI” Publishing House, 2001. P. 79–84.

Сведения об авторах



Кутузов Владимир Михайлович. Родился в 1953. Окончил Ленинградский Электротехнический институт (ЛЭТИ) в 1976 г. Доктор технических наук с 1997 г. Член общества IEEE, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за 2002 год, награжден четырьмя медалями и нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования России». Ректор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Сфера научных интересов: разработка и применение радиолокационных систем и комплексов. Автор более 200 публикаций.

E-mail: VMKutuzov@eltech.ru



Калениченко Сергей Петрович. Родился в 1935. Окончил Уральский политехнический институт в 1956 г. Кандидат технических наук с 1977 г. Ведущий научный сотрудник СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Сфера научных интересов: методы синтеза и обработки сложных радиолокационных сигналов, морская радиолокация, РЛС с обратной связью. Автор более 150 работ.

E-mail: : kalenitchenko@yandex.ru



Попов Александр Григорьевич. Родился в 1945. Окончил ЛЭТИ в 1970 г. Кандидат технических наук с 1986 г. Ведущий научный сотрудник НИИ систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций «Прогноз».

Сфера научных интересов: декаметровая радиолокация, многопозиционная радиолокация. Автор 38 работ.

E-mail: popov_a_g@mail.ru



Веремьев Владимир Иванович. Родился в 1963 г. Окончил ЛЭТИ в 1986 г. Кандидат технических наук с 2000 г. Директор НИИ систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций «Прогноз», в.н.с. СПбГЭТУ.

Сфера научных интересов: комплексные вопросы построения радиолокационных систем, многопозиционная радиолокация. Автор свыше 50 работ.

E-mail: : ver_vi@mail.ru



Коновалов Александр Анатольевич. Родился в 1973 г. Окончил Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ» в 1996 г. Научный сотрудник СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Сфера научных интересов: многопозиционная радиолокация, траекторная обработка радиолокационной информации, методы объединения данных. Автор более 20 работ.

E-mail: al_an_kon@mail.ru



Бархатов Алексей Владимирович. Родился в 1975. Старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). Окончил СПбГЭТУ в 1998 г. по специальности радиотехника. Автор 15 работ.

Сфера научных интересов: цифровая обработка сигналов, спектральный анализ, радиолокационная гидрография, многопозиционные радиолокационные комплексы.

E-mail: aleksbar@yandex.ru



Михайлов Вячеслав Николаевич. Родился в 1977 г. Окончил Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ» в 2000 г. Ассистент кафедры РС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Сфера научных интересов: многопозиционная радиолокация, эвристические методы синтеза сложных радиолокационных сигналов. Автор 10 работ.

E-mail: VNMihaylov@yandex.ru