

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 621.396.969.36

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38>

Макет автомобильного радара диапазона 77 ГГц

О. И. Буренева¹, И. Г. Горбунов², Г. В. Комаров²✉,
А. А. Коновалов², М. С. Куприянов¹, Ю. А. Шичкина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ komarov_gleb@list.ru

Аннотация

Введение. Автомобильные радары в настоящее время являются одним из основных средств обеспечения безопасности автомобильного движения. Их разработка сталкивается с целым рядом технических сложностей, связанных с изготовлением высокоточных печатных плат КВЧ-диапазона. Для ускорения и удешевления создания таких устройств целесообразно отладить алгоритмы обработки радиолокационной информации на макетных устройствах от производителей трансиверов миллиметрового диапазона. Однако параметры таких плат заранее неизвестны, а условия работы автомобильного радара ставят перед вторичной обработкой новые вызовы, поэтому проверка их работоспособности является актуальной задачей.

Цель работы. Оценка работоспособности макета автомобильного радара миллиметрового диапазона и тестирование алгоритмов вторичной обработки на макете автомобильного радара.

Материалы и методы. Использована оригинальная методика вторичной обработки радиолокационной информации с учетом ограничений на применение дополнительных источников данных о движении носителя радара.

Результаты. Проведена экспериментальная оценка работоспособности макета автомобильного радара диапазона 77 ГГц, проверка эффективности первичной обработки для класса целей "автомобиль" в миллиметровом диапазоне, предложены и апробированы оригинальные алгоритмы вторичной обработки радиолокационной информации.

Заключение. Полученные результаты показывают, что возможности макетной платы микросхемы-трансивера позволяют проводить апробацию алгоритмов вторичной обработки без создания собственного опытного образца автомобильного радара. Таким образом, время разработки может быть существенно уменьшено, а после создания собственного аппаратного решения у разработчиков есть образцовое изделие, что позволяет проводить проверки и настройки собственного продукта без использования крайне дорогого и редкого оборудования КВЧ-диапазона.

Ключевые слова: ADAS, линейный частотно-модулированный сигнал, автомобильный радар, адаптивное пороговое устройство, траекторное сопровождение, полярные координаты, фильтр Калмана

Для цитирования: Макет автомобильного радара диапазона 77 ГГц / О. И. Буренева, И. Г. Горбунов, Г. В. Комаров, А. А. Коновалов, М. С. Куприянов, Ю. А. Шичкина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.04.2021; принята к публикации после рецензирования 19.05.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



A Prototype of Automotive 77 GHz Radar

Olga I. Bureneva¹, Igor G. Gorbunov², Gleb V. Komarov^{2✉},
Aleksandr A. Konovalov², Mikhail S. Kupriyanov¹, Yulia A. Shichkina¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ komarov_gleb@list.ru

Abstract

Introduction. Automotive radars are the main tools for providing traffic safety. The development of such radars involve a number of technical difficulties due to the manufacture of high-precision extremely high-frequency (EHF) printed circuit boards. To facilitate the process of creating such devices, the existing algorithms for radar information processing should be debugged using prototypes from manufacturers of mm-band transceivers. However, the parameters of such boards are not known in advance, and the actual operating conditions of the as-produced automotive radars raise new challenges to target tracking algorithms. Therefore, checking the performance of such boards is a relevant research problem.

Aim. To evaluate the performance of a millimeter-wave automotive radar prototype and to test target tracking algorithms using this prototype.

Materials and methods. An original target tracking method was used, which considers the constraints on the use of additional data sources about the radar carrier movement.

Results. An experimental performance evaluation of a 77 GHz automotive radar prototype was carried out. The effectiveness of primary processing for the target class "vehicle" in the millimetre range was checked. Original algorithms for target tracking were proposed and tested.

Conclusion. The obtained results show that the prototype board of a transceiver chip is capable of testing tracking algorithms without creating an own automotive radar prototype. Thus, the developmental process can be significantly shortened. Moreover, after creating a hardware solution, the developer obtains a reference device to test and configure an own product without using extremely expensive and rare EHF equipment.

Keywords: ADAS, frequency-modulated continuous wave signal, automotive radar, constant false alarm rate algorithm, target tracking, polar coordinates, Kalman filter

For citation: Bureneva O. I., Gorbunov I. G., Komarov G. V., Konovalov A. A., Kupriyanov M. S., Shichkina Yu. A. A Prototype of Automotive 77 GHz Radar. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 22–38. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-22-38

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 13.04.2021; accepted 19.05.2021; published online 29.06.2021

Введение. Все более широкое распространение в современных автомобилях приобретают системы помощи водителю (ADAS) с использованием радиолокационных датчиков [1]. Наиболее перспективными признаны автомобильные радары с широкополосным линейным частотно-модулированным сигналом, работающие в полосе 77...81 ГГц. Использование такого высококачественного диапазона имеет свои недостатки. При уменьшении габаритов и улучшении параметров антенных систем повышаются потери в линиях

передачи и диэлектрических материалах, уменьшаются геометрические размеры элементов антенного тракта, существенно усложняется реализация СВЧ-элементов, повышаются требования к технологическим процессам, используемых при производстве СВЧ-тракта радиолокатора. Малая длина волны усложняет защиту от пассивных и активных помех, выделение и классификацию целей, что ужесточает требования к обработке сигнала, к скорости обработки и передачи данных. Все это приводит к удорожанию конечной про-

дукции, неприемлемому для целей массового внедрения радиолокационных датчиков ADAS. В статье рассматривается возможность построения автомобильного радара на основе достаточно несложного и недорогого макета радара диапазона 77 ГГц с применением усовершенствованных алгоритмов вторичной обработки, позволяющих получить приемлемые характеристики обнаружения и классификации целей в дорожной обстановке.

Аппаратное и программное обеспечение экспериментов. Для получения экспериментальных данных использовался макет радара с линейным частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом диапазона 77 ГГц на базе платы сбора данных и приемопередающего модуля фирмы "Calterah" (Китай). Плата приемопередающего модуля Jupiter-S с антенной решеткой представлена на рис. 1, а (фото производителя). Высоко-частотный тракт ЛЧМ-сигнала реализован на микросхеме CAL77A2T4R фирмы "Calterah", специально разработанной для применения в автомобильных радарах, функциональная диаграмма чипа приведена на рис. 1, б.

Микросхема CAL77A2T4R содержит 2 передатчика (TX) и 4 приемника (RX), работающих в диапазоне 76...81 ГГц, встроенные ГУН и петлю ФАПЧ для формирования линейного частотно-модулированного сигнала. Максимальная выходная мощность TX 13 дБм. Полоса приемного тракта по выходу до 10 МГц. Антенна (рис. 1, а) состоит из двух передающих антенн, состоящих, в свою очередь, из двух и 10 (образующих две подрешетки) столбцов и приемной решетки из четырех столбцов. Благодаря этому можно

реализовать как "широкую" диаграмму направленности (ДН) на передачу с использованием двух столбцов при работе радара в ближней зоне, так и "узкую" ДН в дальней зоне при подаче зондирующего сигнала на решетку из 10 столбцов. Приемная решетка, подключенная к четырем RX-каналам, обеспечивает возможность формирования приемной ДН при помощи цифрового диаграммоформирования. Управление работой радара, обмен данными с компьютером и отображение информации обеспечивает плата сбора и обработки данных DCK Calterah. Плата сбора данных имеет в составе 4-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и SoC обработки сигнала фирмы "Xilinx".

Опционально может осуществляться запись "сырого" принятого сигнала непосредственно с выходов АЦП с помощью платы сбора данных (Radar Development Platform – RDP) от "Calterah", имеющей скоростной параллельный интерфейс 5 Гбайт/с для передачи оцифрованных данных на плату Data Collection Kit (DCK) с дальнейшей их передачей на компьютер по USB 3.0.

Управление, настройка режимов радара, изменение параметров сигнала, запись данных осуществляются с помощью ПО Calterah. Вид интерфейса при работе с радаром представлен на рис. 2.

Пространственно-временная цифровая обработка ЛЧМ-сигнала. Первичная обработка сигнала производится средствами платы сбора и обработки данных DCK. Для вторичной обработки в пакете MatLab производилась запись кодаграмм обнаруженных целей в файл данных.

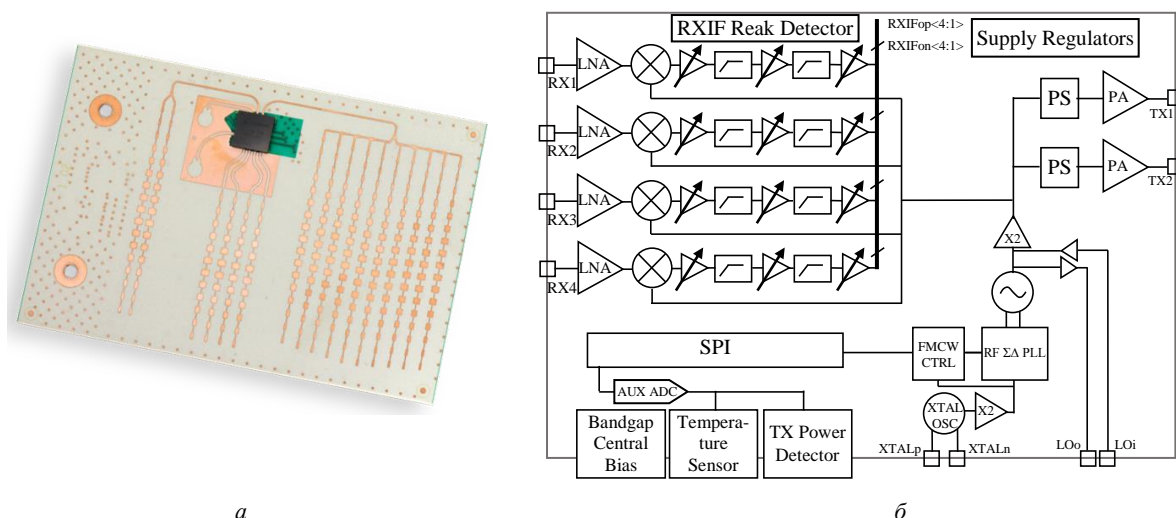


Рис. 1. Приемопередающий модуль с антенной: а – антенна; б – блок-схема приемопередатчика

Fig. 1. Block scheme of the transceiver module and the antenna array: а – antenna; б – block scheme of the transceiver

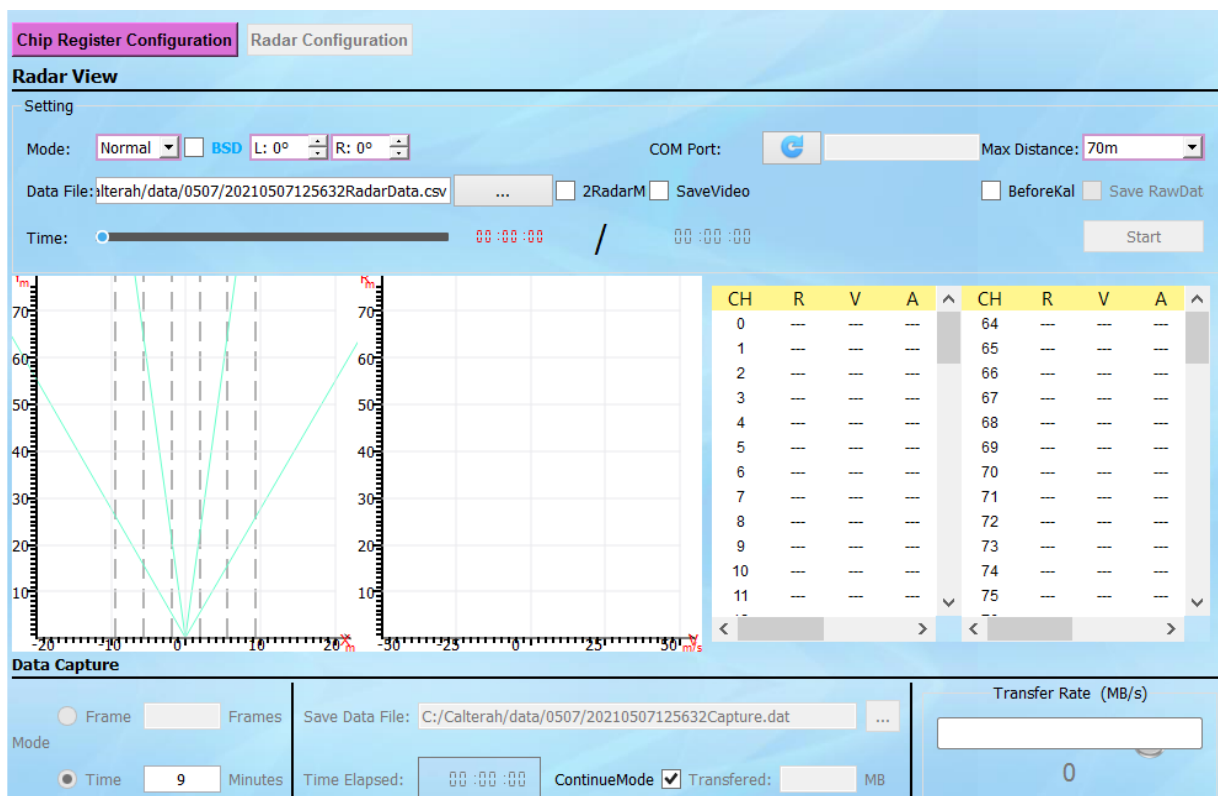


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения радара

Fig. 2. Radar display interface

Принципы обнаружения. На рис. 3 показаны временные диаграммы изменения частоты зондирующего (1) и отраженного (2) ЛЧМ-сигналов. Закон изменения частоты отраженного сигнала определяется временной задержкой Δt и доплеровским сдвигом частоты, обусловленным движением цели относительно радара, Δf_v . Общий сдвиг частоты отраженного сигнала $\Delta f_\Sigma = \Delta f_v + \Delta f_R$, где Δf_R – сдвиг частоты, обусловленный временной задержкой.

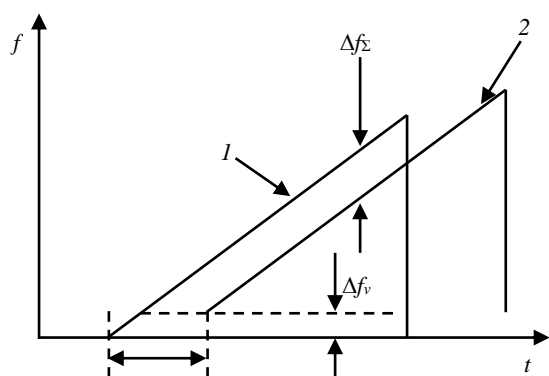


Рис. 3. Закон изменения частоты отраженного ЛЧМ-сигнала

Fig. 3. Examination the transmitted and received FMCW signal frequency

Компоненты общего частотного сдвига определяются как $\Delta f_v = \frac{2f_c v}{c}$; $\Delta f_R = \frac{2RB}{cT}$, где f_c – частота излучаемого сигнала; v – девиация частоты ЛЧМ-сигнала; c – скорость света; T – длительность единичного импульса; R – расстояние до цели. При этом для больших значений v выполняется $\Delta f_R \gg \Delta f_v$, кроме малых дистанций. Чтобы избавиться от неоднозначности по дальности и доплеровской частоте, необходимо сгенерировать пачку из N последовательных импульсов (рис. 4).

Обнаружение цели основано на выделении компонент частотного сдвига принятого сигнала, обусловленных доплеровской частотой и расстоянием, с помощью двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ), которое производится над каждым импульсом в пачке и над всей пачкой из N

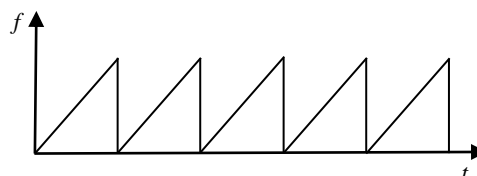


Рис. 4. Генерирование пилообразного ЛЧМ-сигнала

Fig. 4. Generation of triangular FMCW waveforms

импульсов. На выходе получаем для каждого луча приемной антенной решетки двумерную матрицу в координатах дальность–скорость, элементами которой являются амплитуды спектральных составляющих принятого сигнала.

Предварительная обработка сигнала. Для устранения помех и искажений, вызванных несовершенством приемного тракта макета, принятый сигнал подвергается обработке во временной и частотной областях: фильтрации, преобразованию в частотную область, пороговой обработке. Обработка производится отдельно для каждого из четырех лучей антенной решетки с последующим цифровым формированием диаграммы. Отсчеты входного сигнала поступают по четырем каналам АЦП.

Гомодинный приемник макета радара осуществляет перенос принятого сигнала на нулевую частоту. При этом наряду с сигналом разностной частоты, соответствующим отраженному от объекта сигналу, присутствует и остаток прямого сигнала. Он представляет собой низкочастотную помеху, которая может препятствовать обнаружению сигнала на малых дистанциях ввиду перекрытия низкочастотных составляющих полезного сигнала мощными спектральными составляющими помехи. Для подавления этой помехи используется фильтр высоких частот (ФВЧ) с полосой заграждения, обеспечивающей необходимую минимальную дальность

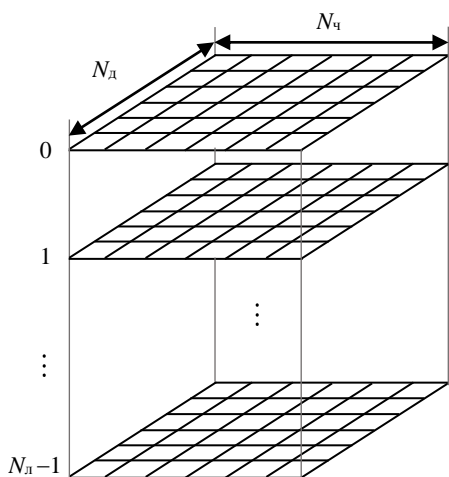


Рис. 5. Массив данных после двумерного БПФ для всех лучей антенной решетки: N_l – число лучей; N_d – число отсчетов по дальности; N_c – число отсчетов по частоте Доплера

Fig. 5. Data sets after two-dimensional FFT for all antenna beams: N_l – beams number; N_d – number of points by distance; N_c – number of points by Doppler shift

обнаружения цели. В данном случае на ПЛИС реализован цифровой КИХ-фильтр, полоса заграждения которого явно велика, что приводит к потерям медленно движущихся целей.

Отсчеты сигнала в одном луче антенной решетки взвешиваются с помощью временного окна Блэкмана и подаются на вычислитель двумерного БПФ (рис. 6).

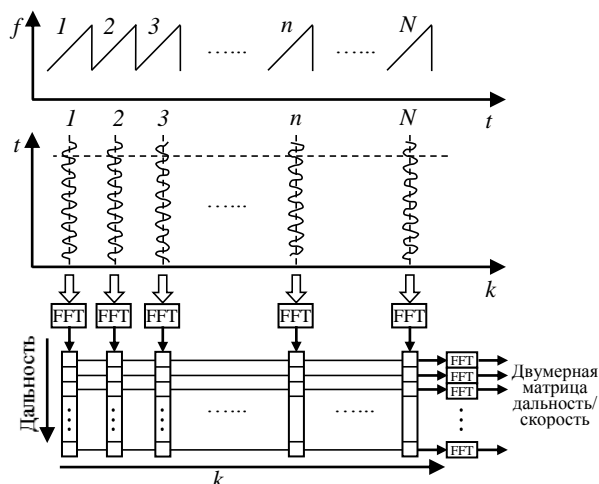


Рис. 6. Пояснение к вычислению двумерного БПФ

Fig. 6. Two-dimensional FFT explanation

Размерность БПФ 512×256 . Учитывая, что первому преобразованию подвергается действительный сигнал, спектр которого симметричен, далее обрабатывается половина отсчетов, соответственно размер выходного массива данных 256×256 отсчетов спектра.

Амплитудное детектирование сигнала производится с помощью алгоритма CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer), так как при необходимости переноса алгоритмов на базу ПЛИС удобно использовать типовое ядро ПЛИС, поставляемое в составе системы автоматизированного проектирования.

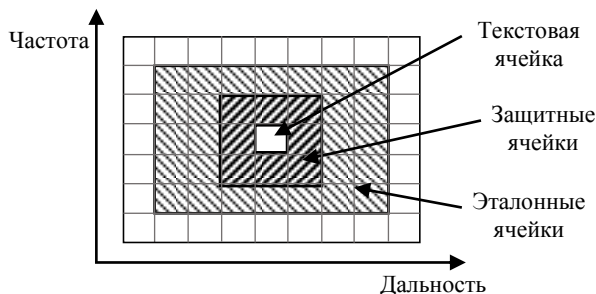


Рис. 7. Обобщенный алгоритм CFAR в плоскости дальность/частота Доплера для одного луча антенной решетки

Fig. 7. Principle of the CA-CFAR algorithm in the range/frequency domain within one antenna beam

Обнаружение цели осуществляется адаптивным пороговым устройством (АПУ), построенным на известном алгоритме, обеспечивающем постоянный уровень ложных тревог CFAR (Constant False Alarm Rate) [2]. Для реализации АПУ выбран алгоритм с вычислением среднего CA CFAR с механизмом защитных ячеек (рис. 7).

Обнаружение сигнала ведется в скользящем окне размера $N \times M$ (N и M – нечетные) для центральной k -й ячейки. При этом окружающие ячейки являются защитными и не участвуют в расчете интенсивности шума. Оценка неизвестной интенсивности шума осуществляется усреднением квадратов амплитуд эталонных ячеек:

$$z_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2.$$

Значение тестовой ячейки сравнивается с порогом T_0 , вычисленным как произведение оценки z_k и параметра настройки α :

$$T_0 = \frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2.$$

Значение коэффициента α обеспечивает требуемую вероятность ложной тревоги при заданном размере окна N [3]:

$$\alpha = N \left(P_f^{-1/N} - 1 \right).$$

Поскольку обработка ведется в двумерном окне, то необходимо суммировать эталонные ячейки в двух измерениях. Выбор размера окна $N \times M$ осуществляется эмпирически, как компромисс между уменьшением потерь и снижением задержки.

Значения исследуемых ячеек z_k сравниваются с порогом T_0 , в ячейках, превышающих порог, фиксируется наличие цели. Для этих ячеек их координаты (дальность, доплеровская частота, время получения отметки) записываются в файл данных и передаются алгоритмам вторичной обработки радиолокационной информации. Процедура обработки производится для всех лучей антенной решетки.

Вторичная обработка. Траекторное сопровождение в автомобильном радаре. РЛС обнаруживает цели в заданной зоне обзора и измеряет их дальность r , азимут α и радиальную скорость v_r . Измерения производятся через временной

интервал, соответствующий периоду обзора РЛС. Все измерения на обзоре являются одновременными. Задача траекторной обработки заключается в обнаружении и построении траекторий подвижных объектов, находящихся в зоне действия РЛС, с получением оценки параметров их движения (координаты, скорость, при необходимости – ускорение) [4, 5].

Выбор системы координат. Традиционно в системах траекторного сопровождения, и в автомобильных радаров в частности, используется декартова (прямоугольная) система координат (ДСК) [6, 7]. Достоинством ДСК является то, что в ней прямолинейное движение цели описывается линейными разностными уравнениями, что дает возможность использовать для фильтрации линейные траекторные фильтры, например фильтр Калмана [8]. Однако именно для автомобильных радаров выбор в пользу ДСК представляется не очевидным. Прежде всего, дороги содержат не только линейные участки, но и криволинейные, описываемые сложными кривыми – клотоидами (дугами с переменным радиусом) [9]. Модели, описывающие движение по клотоиде, существенно нелинейны и требуют применения нелинейных алгоритмов фильтрации [10].

Вторая, и более существенная сложность – учет собственного движения носителя РЛС. При сопровождении в ДСК измерения дальности и азимута некоторого объекта, полученные на очередном обзоре, преобразуются в ДСК, связанную с текущим положением носителя. Экстраполированная отметка выражена в ДСК, связанной с положением объекта на предыдущем обзоре. Поскольку при отождествлении необходимо связать между собой измерения, полученные на разных обзорах, возникает необходимость учета перемещения носителя за время между обзорами. Наиболее предпочтительным вариантом является измерение координат носителя на каждом обзоре при помощи, например, приемника GPS, однако этот вариант ненадежен, поскольку сигналы GPS не всегда доступны (например, в тоннелях) и могут не обладать достаточной точностью. Другой вариант – разработка собственной инерциальной навигационной системы, работающей по сигналам как от спутника, так и от различных датчиков, установленных на автомобиле, либо использование информации от датчиков напрямую. В составе оборудования автомобиля имеются датчики скорости вращения колес и скорости

поворота относительно осей вращения [11], дополнительно можно задействовать акселерометры. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных с адекватностью используемой информации: зависимость оценки скорости носителя датчиком скорости вращения колес от диаметра колес; учет пробуксовки, сноса и скольжения; учет вклада производных по координатам выше второй и т. д. [12]. В любом случае учет движения носителя, который является обязательным для сопровождения в ДСК, требует принятия специальных мер по организации доступа к необходимой информации надлежащего качества, а также адекватного учета погрешностей этих измерений в ходе траекторной обработки.

Наличие проблем, возникающих при учете собственного движения носителя, и отсутствие простых методов их решения побуждают рассмотреть вариант сопровождения в полярной системе координат (ПСК), при котором фильтрации подлежат измеряемые параметры: дальность, азимут и радиальная скорость. Основное ее преимущество в том, что построение траекторий может осуществляться без сторонней информации. Помимо этого схема сопровождения в ПСК обладает рядом дополнительных достоинств. Прежде всего отметим возможность отдельной фильтрации каждой координаты, соответственно дальности, азимута и радиальной скорости, поскольку их измерения независимы. При сопровождении в ДСК обычно используется модель с постоянным ускорением (модель Constant Acceleration, CA), в которой оцениваются координата, скорость и ускорение по осям x и y . В результате вектор состояния включает в себя 6 параметров, размер обрабатываемых ковариационных матриц равен 6×6 . При сопровождении в ПСК при использовании той же модели CA параллельно работают 3 фильтра размерности 3, что существенно снижает вычислительные требования и позволяет распараллеливать вычисления. Наконец, схему сопровождения в ПСК легко распространить на случай отсутствия измерений азимута.

Основным возражением против сопровождения в полярных координатах является нелинейный характер изменения этих координат во времени. Однако для многих практических ситуаций задача заметно упрощается. Рассмотрим следующий пример. Носитель радара движется по двухполосной проезжей части со скоростью 10 м/с, мимо него по встречной полосе проезжает автомобиль

со скоростью 25 м/с. На рис. 8 тонкой черной линией показаны истинные значения дальности, азимута и радиальной скорости цели относительно носителя в зависимости от времени, а жирной – участок, который соответствует зоне видимости автомобильного радара (режим дальней зоны – синий цвет, режим ближней зоны – красный). Зона обзора по горизонтали в режиме дальней зоны: $\pm 6^\circ$ при дистанции 180 м, в режиме ближней зоны – $\pm 45^\circ$ при дистанции 20 м.

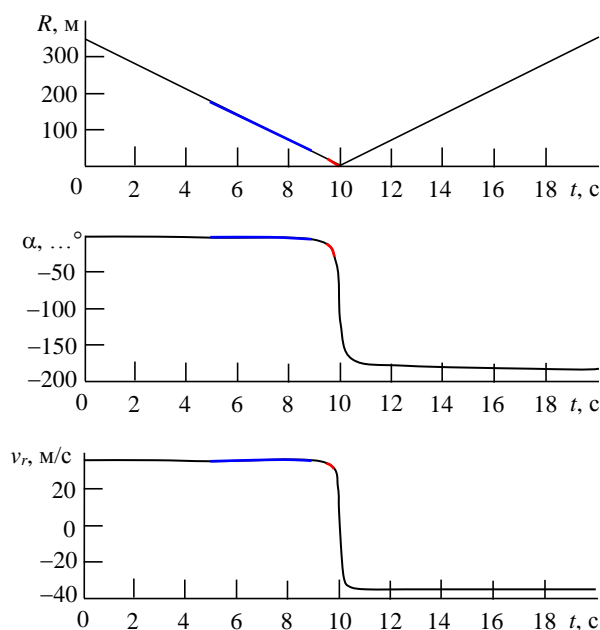


Рис. 8. Значения измеряемых параметров на рабочих участках при встречном прямолинейном движении автомобилей

Fig. 8. Parameter values for vehicles coming linear from the opposite directions

Из представленных графиков следует, что рабочие участки для дальней зоны находятся преимущественно на линейных участках кривых (за исключением слабой нелинейности у азимута). Что касается ближней зоны, то, во-первых, для встречной цели получается крайне небольшое число отметок (в данном примере при скорости сближения 35 м/с всего 4), во-вторых, рабочий участок имеет относительно слабую нелинейность, которая при необходимости будет скомпенсирована использованием модели с постоянным ускорением, аппроксимирующей рабочий участок кривой полиномом второго порядка. Примерно такая же ситуация будет для случая попутного движения. При совершении носителем и целью маневров (перестроение из полосы в полосу, линейное ускорение) характер кривых становится более изломанным, однако и

в этом случае успешное сопровождение вполне достижимо (например, за счет использования методов сопровождения маневрирующей цели).

Общая схема траекторного сопровождения в ПСК. Согласно предлагаемой схеме сопровождения считается, что каждая координата – дальность ρ , азимут α , радиальная скорость v_r – эволюционирует во времени согласно модели с постоянным детерминированным ускорением, т. е. с постоянной второй производной по этой координате (может иметь и нулевое значение) и случайным ускорением в виде белого гауссовского шума с нулевым средним (модель СА). Заметим, что строящаяся траектория описывает движение цели не в физическом пространстве (т. е. не на дороге), как это было бы при сопровождении в ДСК, а в пространстве измеренных координат.

Траекторию движения цели образует последовательность полярных измерений, отнесенных к одному объекту. На каждом обзоре на схему траекторной обработки поступает набор отметок, содержащих измерения дальности, азимута и радиальной скорости. Траектории целей, также выраженные в этих координатах, экстраполируются на момент текущего обзора; новые и экстраполированные отметки отождествляются между собой обычным образом; отметки, присвоенные траекториям, уточняются (фильтруются). Отметки, не присвоенные существующим траекториям, служат для начала обнаружения новых траекторий, состоящего из завязки и подтверждения [13]. Результат траекторной обработки на очередном обзоре – текущие оценки положения и скорости целей – может быть выражен в ПСК либо преобразован в прямоугольную СК с получением текущих координат цели (x, y) в ДСК, связанной с текущим положением и ориентацией носителя. Непосредственно после преобразования может быть получен только двумерный вектор пространственных координат, для нахождения вектора скорости в ДСК необходима информация о перемещении носителя за время между обзорами. Если такая информация есть, ее можно использовать также для компенсации искажения измерений координат цели, вызванных маневрами носителя.

Рассмотрим работу алгоритма траекторного сопровождения в ПСК более подробно.

Модели состояния и наблюдения. Вектор состояния \mathbf{x} описывает состояние объекта, вектор

измерения \mathbf{z} содержит измеряемые параметры объекта. Реализуется раздельная фильтрация по каждой координате согласно модели СА. Постоянная составляющая вторых производных по координатам моделируется некоторой оцениваемой на каждом шаге детерминированной величиной, случайная – гауссовской случайной величиной с нулевым средним, их дисперсии σ_ρ^2 , σ_α^2 , и $\sigma_{v_r}^2$ считаются известными.

Векторы измерения отдельных фильтров:
 $\mathbf{z}_\rho = [\rho]$, $\mathbf{z}_\alpha = [\alpha]$, $\mathbf{z}_{v_r} = [v_r]$.

Векторы состояния отдельных фильтров:
 $\mathbf{x}_\rho = [\rho, \dot{\rho}, \ddot{\rho}]^T$, $\mathbf{x}_\alpha = [\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}]^T$, $\mathbf{x}_{v_r} = [v_r, \dot{v}_r, \ddot{v}_r]^T$.

Объединенный вектор измерения:
 $\mathbf{z} = [\rho, \alpha, v_r]^T$.

Объединенный вектор состояния:
 $\mathbf{x} = [\rho, \alpha, v_r, \dot{\rho}, \dot{\alpha}, \dot{v}_r, \ddot{\rho}, \ddot{\alpha}, \ddot{v}_r]^T$.

Уравнения движения: $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}\mathbf{v}_k$, где

$$\mathbf{x} - \text{один из } \mathbf{x}_\rho, \mathbf{x}_\alpha, \mathbf{x}_{v_r}; \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} -$$

матрица экстраполяции; τ – интервал между моментами времени t_k и t_{k+1} ;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \tau^2/2 & \tau & 1 \end{bmatrix}^T -$$

вектор учета случайных ускорений; \mathbf{v}_k – случайное ускорение по данной координате, белый гауссовский шум $\mathbf{v} \sim N(0, \sigma_q^2)$, σ_q^2 – одна из σ_ρ^2 , σ_α^2 , и $\sigma_{v_r}^2$.

Уравнения наблюдения: $\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k$, где

$$\mathbf{z} - \text{один из } \mathbf{z}_\rho, \mathbf{z}_\alpha, \mathbf{z}_{v_r}; \quad \mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0] - \text{вектор}$$

наблюдения; \mathbf{w}_k – шум измерения данной координаты, белый гауссовский шум $\mathbf{v} \sim N(0, \sigma^2)$;

$$\sigma^2 - \text{одна из } \sigma_\rho^2, \sigma_\alpha^2 \text{ и } \sigma_{v_r}^2.$$

Подчеркнем, что σ_ρ^2 , σ_α^2 и $\sigma_{v_r}^2$ – это дисперсии погрешностей измерений, т. е. параметры радара как измерительного устройства, а σ_ρ^2 , σ_α^2 и $\sigma_{v_r}^2$ – это дисперсии случайных ускорений, т. е. параметры модели, используемой в траекторном сопровождении. Первые должны быть

заданы, вторые являются параметрами настройки траекторного сопровождения.

В ходе траекторного сопровождения над полученным на очередном обзоре данными выполняются операции отождествления, фильтрации, обнаружения траекторий, проверки критерия сброса.

Отождествление (ассоциация) данных в ходе траекторного сопровождения заключается в нахождении однозначного соответствия между обнаруженными на обзоре отметками и находящимися в системе траекториями. Отождествление производится сначала для сопровождаемых траекторий, затем для обнаруживаемых.

В ходе отождествления выполняются следующие действия:

1. Экстраполяция каждой траектории – прогнозирование вектора состояния траектории на момент текущего обзора.
2. Стробирование – проверка возможности принадлежности каждой отметки одной из анализируемых траекторий.
3. При необходимости – точное отождествление.

Экстраполированная оценка вектора состояния $\mathbf{x}_{k|k-1}$ и его ковариация $\mathbf{P}_{k|k-1}$ для каждой траектории вычисляются на основе предыдущей оценки вектора состояния \mathbf{x}_{k-1} и его ковариации \mathbf{P}_{k-1} :

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1};$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = (\mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G} \sigma^2 \mathbf{G}^T) / \alpha_w,$$

где $\alpha_w = (N_w - 1) / N_w$ – коэффициент экспоненциального забывания, которое вводится для повышения качества учета детерминированных изменений первой и второй производных по координатам посредством ограничения эффективной длины последовательности векторов измерений, на основе которой вычисляется фильтрованная оценка; N_w – эффективная длина скользящего окна.

Стробирование выполняется в полярных координатах в m -мерном пространстве, где m – размер вектора измерений \mathbf{z} ($m = 3$), для каждой пары i -я отметка / j -я траектория. При этом для данной пары вычисляется статистическое расстояние (расстояние Махаланобиса)

$$\rho_{ij} = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij}^{-1} \mathbf{v}_{ij} \quad (\text{где } \mathbf{v}_{ij} = \mathbf{z}_{jk} - \mathbf{H} \mathbf{x}_{i|k|k-1} - \text{вектор}$$

невязки; $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{P}_{i|k|k-1} + \mathbf{R}_j$ – его ковариационная матрица) и сравнивается с порогом стробирования $\gamma = \chi_m^2(P_G)$, где P_G – заданная вероятность стробирования. При $\rho_{ij} \leq \gamma$ принимается решение о том, что i -я отметка может принадлежать j -й траектории. Результат стробирования – матрица стробирования $\mathbf{A} \left[a_{ij} = \text{bool}(\rho_{ij} \leq \gamma) \right]$ и матрица стоимости $\mathbf{C} \left[c_{ij} = \rho_{ij} \right]$.

Если оказывается, что в каждой линии матрицы стробирования присутствует не более одной единицы, т. е. каждой отметке поставлено в соответствие не более одной траектории и наоборот, операция стробирования считается завершённой. В противном случае возникает необходимость проведения точного отождествления. В ходе точного отождествления необходимо на основе матриц \mathbf{A} и \mathbf{C} сформировать оптимальное в некотором смысле решение, при котором скорректированная матрица стробирования удовлетворяла бы условию "не более одной единицы в линии". В основе работы алгоритма точного отождествления лежит метод глобального ближайшего соседа (ГБС) [14]. Суть метода заключается в минимизации суммарной стоимости выбранного варианта распределения отметок по траекториям. Решение задачи назначения отметок траекториям осуществляется при помощи алгоритма назначения Манкреса (он же венгерский), минимизирующего общую стоимость выбранной последовательности паросочетаний [15]. Достоинство алгоритма – высокая вычислительная эффективность, позволяющая реализовывать его в системах сопровождения реального времени. В описываемом случае метод Манкреса решает задачу ГБС, минимизируя суммарное расстояние между траекториями и стробированными отметками.

Алгоритм фильтрации вычисляет текущую оценку вектора состояния цели \mathbf{x}_k и его ковариационной матрицы \mathbf{P}_k на основе присвоенного траектории на данном обзоре измерения \mathbf{z}_k с ковариационной матрицей \mathbf{R}_k . Для фильтрации параметров траектории используется алгоритм на основе фильтра Калмана (ФК) для модели СА. В системе функционируют параллельно 3

ФК, каждый из которых работает с одной координатой.

Инициализация ФК производится на основе измерений трех последовательных обзоров: на втором обзоре по двум измерениям вычисляется предварительная оценка первой производной, т. е. "скорости" изменения координаты (на примере дальности):

$$\dot{\rho}_2 = (\rho_2 - \rho_1) / \tau_2; \sigma_{\dot{\rho}_2}^2 = (\sigma_{\rho_2}^2 - \sigma_{\rho_1}^2) / \tau_2^2,$$

на третьем обзоре по двум оценкам первой производной вычисляется предварительная оценка второй производной ("ускорения" изменения координаты):

$$\ddot{\rho}_3 = (\dot{\rho}_3 - \dot{\rho}_2) / \tau_3; \sigma_{\ddot{\rho}_3}^2 = (\sigma_{\dot{\rho}_3}^2 - \sigma_{\dot{\rho}_2}^2) / \tau_3^2,$$

где $\tau_k = t_{k-1} - t_k$ – временной интервал между соседними измерениями (далее индекс у τ указываться не будет). Соответственно на первом обзоре существования траектории вектор состояния для координаты ρ имеет вид $\mathbf{z}_{\rho 1} = [\rho]$, на втором $\mathbf{z}_{\rho 2} = [\rho, \dot{\rho}]$, на третьем и последующих – $\mathbf{z}_{\rho k} = [\rho, \dot{\rho}, \ddot{\rho}]$.

Результирующая оценка вектора состояния и ее ковариация находятся так:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_{k|k-1}),$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H})^{-1},$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T \mathbf{R}_k^{-1}$ – матричный коэффициент усиления фильтра Калмана.

В основе метода обнаружения траектории лежит алгоритм последовательных серийных испытаний, реализующий логику "2/L + M/N". Он состоит из трех этапов:

1) создания новой завязываемой траектории по отметке, не отождествленной ни с одной из имеющихся в системе траекторий;

2) завязки траектории и присвоения ей статуса подтверждаемой после получения ею второй отметки за L последующих обзоров;

3) подтверждения траектории и присвоения ей статуса сопровождаемой после получения ею не менее M отметок за N последующих обзоров.

Стробирование при завязке выполняется для каждой завязываемой траектории и каждой от-

метки, не отождествленной с сопровождаемыми и подтверждаемыми траекториями. Оно основано на том, что цель, имеющая определенную динамику, изменяет за время между обзорами свои параметры (дальность, азимут и радиальную скорость) в определенных пределах. Следует задать максимальные и минимальные значения скорости v_{\max}, v_{\min} , максимальную скорость поворота ω_{\max} и максимальное значение ускорения a_{\max} , вычислить для каждой пары отметка/траектория производные по дальности, азимуту и скорости и сравнить их с порогами. Дополнительно также можно сравнить знаки у полученной оценки производной по дальности и измеренных значений радиальной скорости у отметки и траектории – все 3 знака должны совпадать. Если некоторая отметка попала в стробы нескольких траекторий, следует выбрать одну из них для продолжения; при этом используется метод ближайшего соседа. Если в строб одной траектории попало m отметок, траектория продолжается по каждой из них, при этом создается m подтверждаемых траекторий с одинаковыми первыми отметками и разными вторыми. Тем самым гарантируется завязка истинной траектории при наличии в стробе истинной отметки. Задача отсеивания возникающих при этом ложных траекторий возлагается на алгоритм подтверждения.

Для подтверждаемых траекторий используется тот же самый набор алгоритмов отождествления и фильтрации, что и для сопровождаемых.

При пропуске обнаружения на некотором обзоре в качестве фильтрованной оценки траектории присваивается экстраполированная оценка. Сброс сопровождения траектории производится при наличии у нее серии из K пропусков обнаружений подряд.

Экспериментальные результаты. Получение экспериментальных данных. Записи сигнала радарного макета производились при следующих параметрах радара:

- включены оба передатчика ("узкий" и "широкий" луч);
- полоса зондирующего сигнала – 135 МГц;
- период повторения зондирующего сигнала – 30.32 мкс;
- количество накапливаемых импульсов – 256;
- размерность БПФ по дальности – 512;
- размерность БПФ по скорости – 256.

Условия проведения эксперимента были максимально приближены к реальным условиям.

возникающим при наблюдении за дорожной обстановкой, характерной для дворов жилых домов и улиц в центре города.

В качестве места наблюдения использовался внутренний двор СПбГЭТУ. Со всех сторон он окружен зданиями, у одного из которых расположена автомобильная стоянка. Во время проведения эксперимента в поперечном относительно нормали антенной решетки направлении перемещались пешеходы (студенты и сотрудники университета), которые усложняли наблюдаемую при помощи радара обстановку и максимально приближали ее к реально возникающей при нахождении автомобиля во дворе жилого дома.

Основным подвижным объектом в данном эксперименте был автомобиль, перемещающийся как в направлении "от" макета, так и в направлении "к" макету. Автомобиль двигался с небольшой скоростью, обеспечивающей, с одной стороны, безопасность пешеходов на территории университета, а с другой – усложняющей первичную обработку по выявлению автомобиля на фоне неподвижных объектов.

В качестве дополнительно усложняющих фо-

ноцелевую обстановку объектов можно выделить:

- 1) флажки с поднятыми флагами, создающие дополнительные неподвижные цели с доплеровским сдвигом;
- 2) деревья, частично экранирующие перемещающиеся цели, частично добавляющие дополнительные отметки;
- 3) перемещающиеся по территории автомобили, которые не только добавляют свои отметки, но и экранируют основной объект наблюдения.

Далее представлены результаты траекторного сопровождения для одного из экспериментов, в котором тестовый автомобиль двигался "змейкой" по направлению к РЛС с дальности около 60 м.

На рис. 9 представлены результаты измерений и сопровождения в координатах дальность / азимут. Черные точки – первичные измерения, линии разного цвета – построенные траектории подвижных объектов, находившихся в зоне видимости РЛС. Номер указан у начала траектории.

Траектория 114 – это тестовая цель, 535 – другая машина, траектории 25, 225, 729 и 763 принадлежат, по всей видимости, пешеходам. Пешеход, соответствующий 225-й траектории,

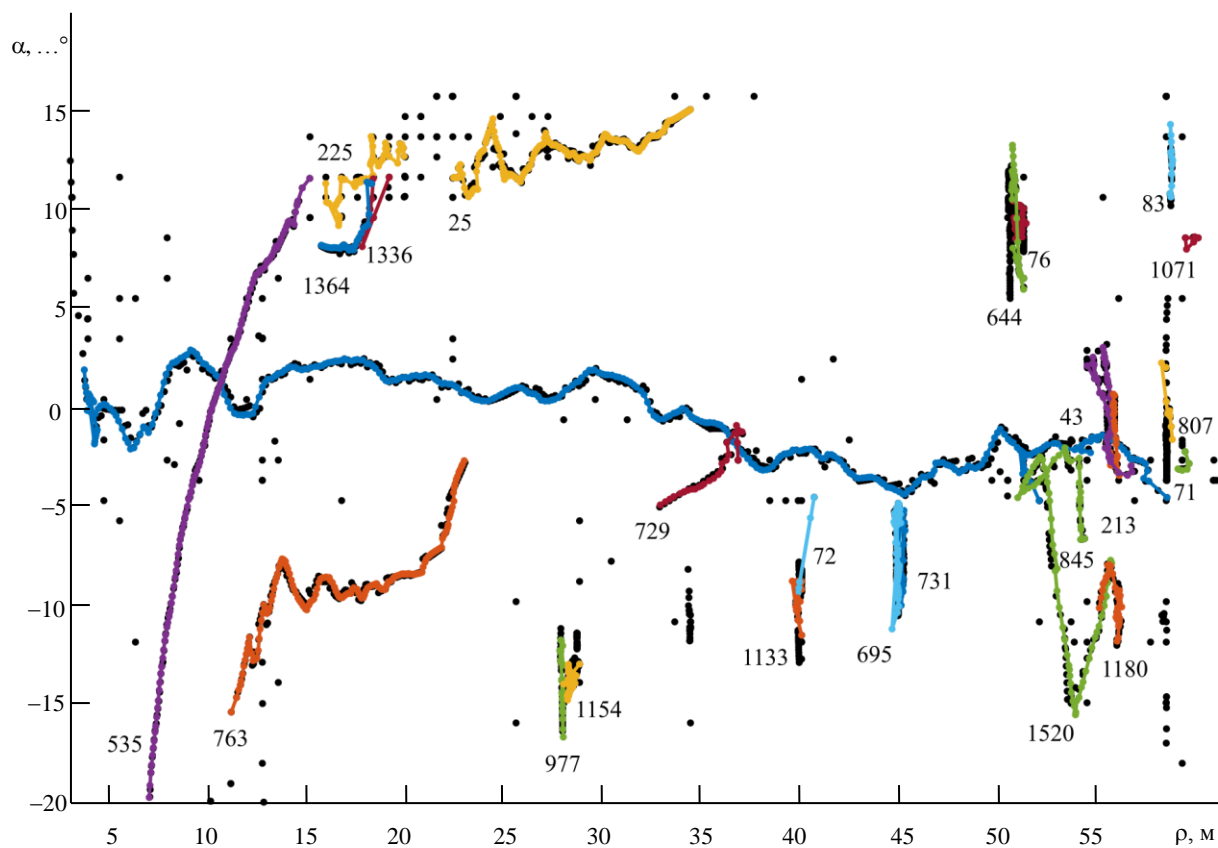


Рис. 9. Траектории, построенные вторичной обработкой после обработки тестовой записи

Fig. 9. Results of the test data trajectory processing

возможно, сел в 535-й автомобиль; пешеход, соответствующий 729-й траектории, проходил рядом с тестовым автомобилем. В данном эксперименте траектория автомобиля обнаружена на дальности около 56 м и сопровождается до дальности 4 м.

На рис. 10 представлены результаты сопровождения, выраженные в прямоугольных координатах.

Для траектории 114, соответствующей тестовой цели, построены графики зависимости скорости (рис. 11) и курса (рис. 12) от времени (время – в секундах от начала эксперимента).

На рис. 11 тонкой синей линией показан модуль скорости, вычисленный на основе оценок координат объекта в прямоугольной СК, он же – модуль вектора скорости автомобиля в прямоугольной СК, связанной с РЛС (красными штрихами – медианное значение, вычисленное по 100 отсчетам). Поскольку РЛС в данном эксперименте неподвижна, он соответствует абсолютной скорости автомобиля. На начальном этапе траектории дисперсия этой оценки довольно высока, в установившемся режиме сопровождения (после 8-й секунды) существенно ниже. Толстой черной линией показана оценка производной измеренной дальности, а так как автомобиль движется практически на РЛС, эта производная также соответствует абсолютной скорости автомобиля. На установившемся участке траектории наблюдается хорошее совпадение этих оценок.

На рис. 12 показан курс автомобиля, вычисленный на основе оценок координат объекта в прямоугольной СК, он же – курс автомобиля в СК, связанной с РЛС (штриховая линия – медианное значение, вычисленное по 100 отсчетам). Поскольку автомобиль двигался в направлении на РЛС, его курс в этой СК должен находиться около 180° (но не равняться этому значению, поскольку автомобиль двигался "змейкой").

Как видно из графиков, оцененные параметры траектории тестовой цели совпадают с реальными.

Заключение и перспективы. Эксперименты с использованием макета автомобильного радара диапазона 77 ГГц показывают, что при применении разработанных алгоритмов вторичной обработки сигнала достигаются приемлемые характеристики обнаружения и сопровождения целей в стандартной дорожной обстановке.

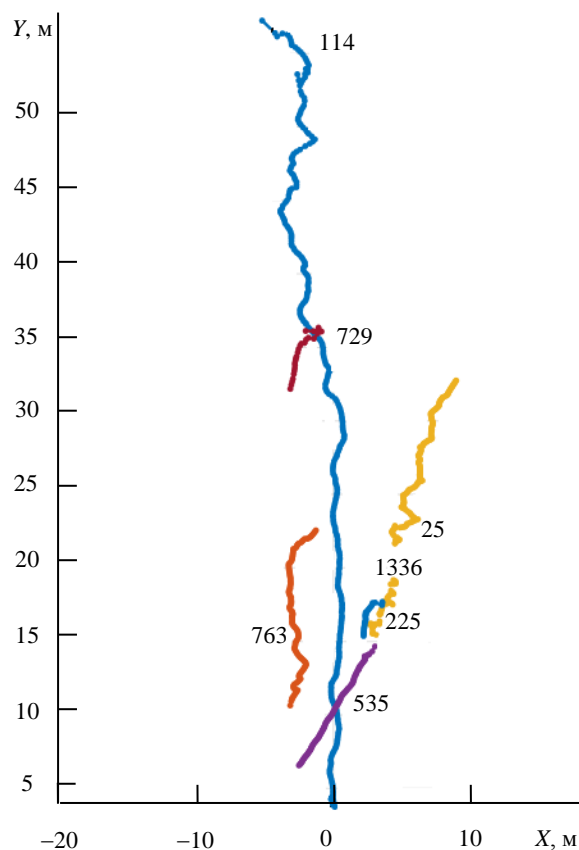


Рис. 10. Результат сопровождения в прямоугольных координатах (оставлены наиболее характерные траектории)

Fig. 10. Targets tracking in Cartesian coordinates (the most specific trajectories are presented)

Оцененные с помощью алгоритма траекторной обработки параметры траектории тестовой цели совпадают с реальными. Вместе с тем выявлен ряд недостатков тестируемого макета автомобильного радара.

Так, полоса заграждения ФВЧ слишком велика, что приводит как к увеличению минимальной дальности обнаружения, так и к увеличению дисперсии оценки минимальной скорости при траекторном сопровождении. Мощные помеховые сигналы в ближней зоне создают достаточно большое количество ложных отметок. Очевидно, необходимо усовершенствование алгоритмов первичной обработки.

Результаты измерений показывают высокий энергетический потенциал испытываемого макета. Даже при сравнительно простой антенне и СВЧ-тракте наблюдается уверенное сопровождение автомобиля на дальности более 50 м.

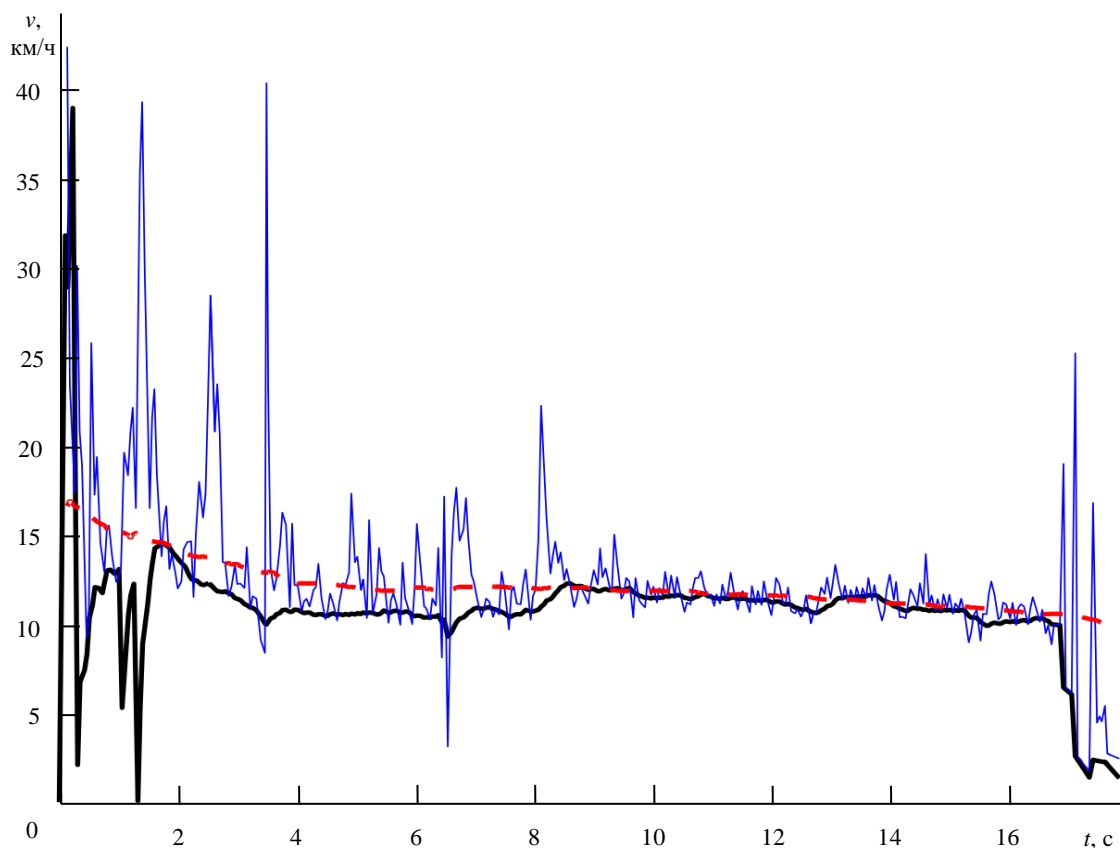


Рис. 11. Оценка скорости тестового автомобиля

Fig. 11. Velocity of the test vehicle estimation

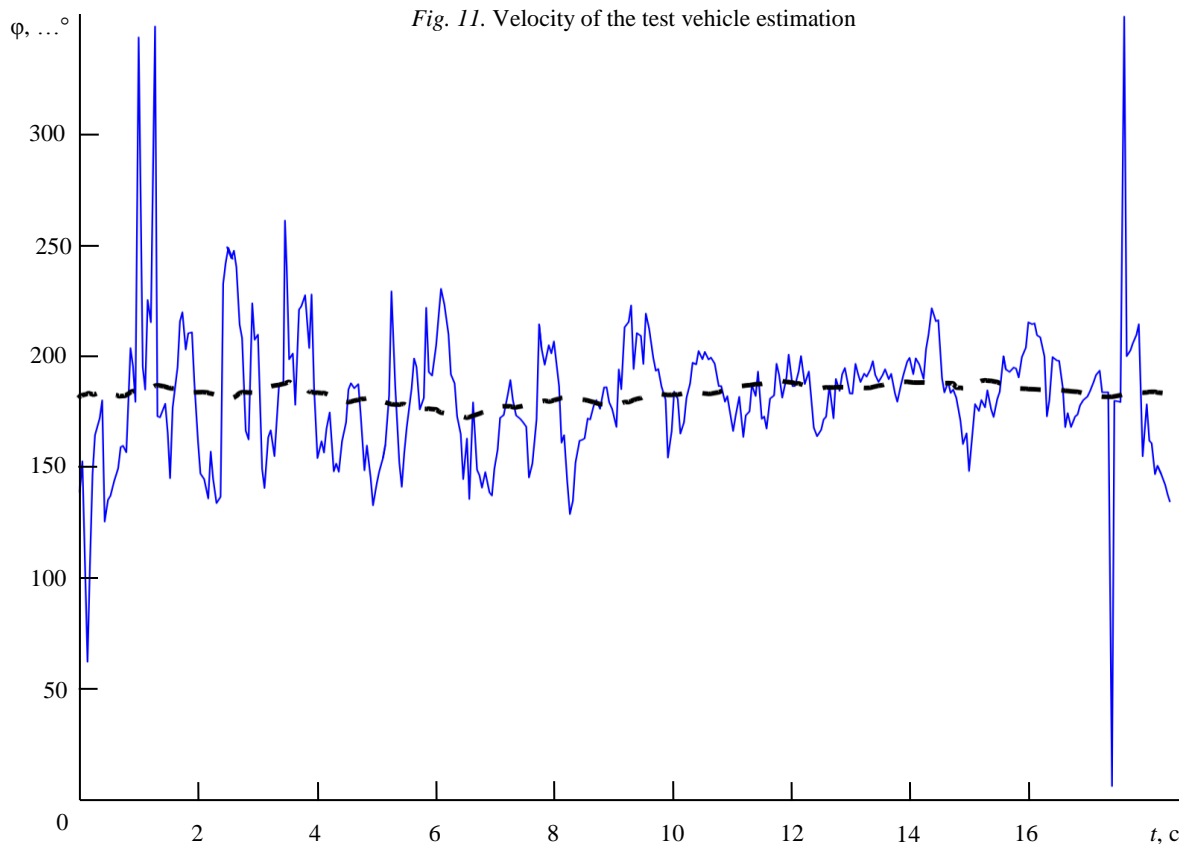


Рис. 12. Оценка курса тестового автомобиля

Fig. 12. Estimation of the moving direction of the test vehicle

Гибкость настроек и удобство программной оболочки позволяют отрабатывать алгоритмы вторичной обработки (а при покупке платы Data Collection Kit – и первичной) без необходимости разработки дорогостоящих прецизионных СВЧ-плат миллиметрового диапазона. В случае реализации собственной первичной обработки нейтрализуются практически все отмеченные ранее недостатки обработки от производителя. Един-

ственным непреодолимым минусом остается низкое качество документации, поставляемой вместе с платами, существенно увеличивающее время, требуемое для освоения макета.

Дальнейшая разработка алгоритмов вторичной обработки заключается в их адаптации к маневрам носителя, а также, при возможности, учете с этой целью показаний различных внешних датчиков.

Авторский вклад

Буренева Ольга Игоревна – проведение компьютерного моделирования.

Горбунов Игорь Геннадьевич – подготовка и оформление текста статьи.

Комаров Глеб Владимирович – подготовка и проведение эксперимента, предварительная обработка записей первичной радиолокационной информации.

Коновалов Александр Анатольевич – подготовка модели вторичной обработки радиолокационной информации, проведение компьютерного моделирования.

Куприянов Михаил Степанович – постановка задачи, общее руководство и обеспечение возможности проведения эксперимента, участие в обсуждении результатов.

Шичкина Юлия Александровна – помощь в выделении вычислительных мощностей, обсуждение результатов.

Author's contribution

Olga I. Bureneva, computer simulation.

Igor G. Gorbunov, preparation of the paper text.

Gleb V. Komarov, carrying out of experiment, prepare data for computer simulation.

Aleksandr A. Konovalov, create model of secondary processing of radar information, computer simulation.

Mikhail S. Kupriyanov, statement of the problem, management of the work, assistance in organizing the experiment and discussion of the results.

Yulia A. Shichkina, assistance in allocating server for computer simulation and discussion of the results.

Список литературы

1. Automotive RADAR / H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer // Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016. P. 325–430.

2. Белецкий Ю. С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Радиотехника, 2011. 436 с.

3. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. Georgia Institute of Technology. New York: McGraw Hill, 2005. 539 p.

4. Schiementz M. Postprocessing Architecture for an Automotive Radar Network. Gettingen: Cuvillier Verlag, 2005. 192 p.

5. Eltrass A., Khalil M. Automotive radar system for multiple-vehicle detection and tracking in urban environments // IET Intelligent Transport System. 2018. Vol. 12, iss. 8. P. 783–792. doi: 10.1049/iet-its.2017.0370

6. Tracking vehicles using radar detections / J. Gunnarsson, L. Svensson, L. Danielsson, F. Bengtsson

// Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Istanbul, Turkey, 13–15 June 2007. P. 296–302. doi: 10.1109/IVS.2007.4290130

7. A New Vehicle Motion Model for Improved Predictions and Situation Assessment / J. Sorstedt, L. Svensson, F. Sandblom, L. Hammarstrand // IEEE Trans. on Intelligent Transport. Syst. 2011. Vol. 12, iss. 4. P. 1209–1219. doi: 10.1109/TITS.2011.2160342

8. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВИЦ, 2000. 428 с.

9. Dickmanns E. D., Zapp A. A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision // Proc. SPIE 0727, Mobile Robots I, 25 Feb. 1987. P. 161–168. doi: 10.1117/12.937795

10. Schubert R., Richter E., Wanielik G. Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking // IEEE 11th Intern. Conf. on Information Fusion, Cologne, Germany, 2008. P. 1–6. doi: 10.1109/ICIF.2008.4632283

11. Mörbe M. Vehicle Dynamics Sensors for DAS // Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Infor-

mation, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016. P. 279–302.

12. Techmer A. Real time motion analysis for monitoring the rear and lateral road // IEEE Intelligent Vehicles Symp. Parma, Italy, 14–17 June 2004. P. 704–709. doi: 10.1109/IVS.2004.1336470

13. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

14. Konstantinova P., Udarev A., Semerdjiev T. A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Computer Systems and Technologies, CompSys-Tech'2003. 2003. P. 1–6. doi: 10.1145/973620.973668

15. Pilgrim R. A. Munkres' Assignment Algorithm Modified for Rectangular Matrices. URL: <https://csclab.murraystate.edu/~bob.pilgrim/445/munkres.html> (дата обращения 27.04.2021)

Информация об авторах

Буренева Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры ВТ СПбГЭТУ. Автор 96 печатных работ. Сфера научных интересов – разработка цифровых систем на базе ПЛИС, в том числе локальных систем контроля и управления, бит-поточковых вычислительных устройств, узлов для нейроморфных вычислений. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: OIBur@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6169-454X>

Горбунов Игорь Геннадьевич – научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 31 публикации. Сфера научных интересов – комплексные вопросы построения радиолокационных систем, радиолокационные методы мониторинга морской поверхности. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: gor-ig@mail.ru

Комаров Глеб Владимирович – аспирант кафедры РС СПбГЭТУ. Автор четырех научных статей. Сфера научных интересов – антенные системы, электродинамическое моделирование, распространение радиоволн. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: komarov_gleb@list.ru

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 52 публикаций, в том числе пяти монографий и двух учебных пособий. Сфера научных интересов – вторичная и третичная обработка радиолокационной информации, объединение данных, многопозиционная радиолокация, бистатические радиотехнические системы. Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: al_an_kon@mail.ru

Куприянов Михаил Степанович – доктор технических наук, профессор, руководитель научного и образовательного направлений Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти монографий, 45 статей и тезисов докладов. Сфера научных интересов – программное обеспечение информационных систем реального времени (архитектурно зависимое программирование); методы и распределенные системы интеллектуального анализа данных и извлечения знаний; теория и методы исследования самовосстанавливающихся информационных систем; программное обеспечение встроенных систем; алгоритмы и параллельные системы цифровой обработки сигналов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: mikhaail.kupriyanov@gmail.com

Шичкина Юлия Александровна, доктор технических наук, руководитель отдела "Технологии сильного искусственного интеллекта в физиологии и медицине" в составе международного инновационного института искусственного интеллекта, кибербезопасности и коммуникаций им. А. С. Попова Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ". Автор двух монографий, 42 статей и тезисов докладов. Сфера научных интересов – математическое моделирование, параллельные вычисления на системах MPP и SMP; оптимизация доступа к базам данных; применение методов ИИ в прикладных задачах. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: strange.y@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7140-1686>

References

1. Winner H. Automotive RADAR. Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016, pp. 325–430.
2. Beletsky Y. S. Methods and algorithms for contrast detection of signals against the interference background with a priori unknown characteristics. M., *Radio-technika*, 2011. (In Russ.)
3. Richards M. A. Fundamentals of radar signal processing. New York, McGraw Hill, 2005.
4. Schiementz M. Postprocessing Architecture for an Automotive Radar Network. Gettingen, Cuvillier Verlag, 2005.
5. Eltrass A., Khalil M. Automotive radar system for multiple-vehicle detection and tracking in urban environments. IET Intelligent Transport System. 2018, no. 8, pp. 783–792. doi: 10.1049/iet-its.2017.0370
6. Gunnarsson J., Svensson L., Danielsson L., Bengtsson F. Tracking vehicles using radar detections. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symp., Istanbul, Turkey, June 13–15, 2007, pp. 296–302. doi: 10.1109/IVS.2007.4290130
7. Sörstedt J., Svensson L., Sandblom F., Hammarstrand L. A New Vehicle Motion Model for Improved Predictions and Situation Assessment. IEEE Trans. on Intelligent Transport. Syst. 2011, no. 4, pp. 1209–1219. doi: 10.1109/TITS.2011.2160342
8. Kuzmin S. Z. Digital radar. Introduction to theory Kiev, KVIC. 2000, 428 p. (in Russ.)
9. Dickmanns E. D., Zapp A. A Curvature-based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision. Proc. SPIE 0727, Mobile Robots I. 25 Feb. 1987, pp. 161–168. doi: 10.1117/12.937795
10. Schubert R., Richter E., Wanielik G. Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking. IEEE 11th Intern. Conf. on Information Fusion. Cologne, Germany, 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIF.2008.4632283
11. Morbe M. Vehicle Dynamics Sensors for DAS. Handbook of Driver Assistance Systems. Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort. Springer, 2016, pp. 279–302.
12. Techmer A. Real time motion analysis for monitoring the rear and lateral road. IEEE Intelligent Vehicles Symp. Parma, Italy, 14–17 June 2004, pp. 704–709. doi: 10.1109/IVS.2004.1336470
13. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsyonnoy informatsii* [Basic of the Radar Target Tracking]. Part I. SPb, LETI Publishers, 2013. (In Russ.)
14. Konstantinova P., Udarev A., Semerdjiev T. A study of a target tracking algorithm using global nearest neighbor approach. Intern. Conf. on Computer Systems and Technologies, CompSysTech'2003. 2003, pp. 1–6. doi: 10.1145/973620.973668
15. Pilgrim R. A. Munkres' Assignment Algorithm Modified for Rectangular Matrices. Available at: <https://csclab.murraystate.edu/~bob.pilgrim/445/munkres.html> (accessed 27.04.2021)

Information about the authors

Olga I. Bureneva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor in Computer Science from the Saint Petersburg Electrotechnical University (2005). The Author of 96 printed works. Area of expertise: FPGA-based digital systems, including local control and management systems, bitstream computing devices, and units for neuromorphic computing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: OIBur@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6169-454X>

Igor G. Gorbunov, Research Fellow Research Institute "Prognov". The Author of 31 scientific publications. Area of expertise: complex issues of building radar systems, radar methods for monitoring the sea surface.

Address: Research Institute "Prognov", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: gor-ig@mail.ru

Gleb V. Komarov, post-graduate student of the Department of radio system Saint Petersburg Electrotechnical University. The Author of 4 scientific articles. Area of expertise: antenna systems, electrodynamic modeling, radio wave propagation.

Address: Research Institute "Prognov", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: komarov_gleb@list.ru

Aleksandr A. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Institute "Prognoz" St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 52 scientific publications, including 5 monographs and 2 textbooks. Area of expertise: secondary and tertiary processing of radar information, data fusion, multi-position radar, bistatic radio systems.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: al_an_kon@mail.ru

Mikhail S. Kupriyanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Scientific and Educational Directions of the St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 5 monographs, 45 scientific articles and abstracts. Area of expertise: software for real-time information systems (architecture-dependent programming); methods and distributed systems for data mining and knowledge extraction; theory and research methods for self-healing information systems; embedded systems software; algorithms and parallel systems for digital signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: mikhail.kupriyanov@gmail.com

Yulia A. Shichkina, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department "Technologies of Artificial Intelligence in Physiology and Medicine" as part of the International Innovative Institute of Artificial Intelligence, Cybersecurity and Communications named after V. I. A. S. Popov of the St. Petersburg State Electrotechnical University. The Author of 2 monographs, 42 scientific articles and abstracts. Area of expertise: mathematical modeling, parallel computing on MPP and SMP systems; optimization of access to databases; application of AI methods in applied problems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: strange.y@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7140-1686>
