

УДК 621.396.96

С. В. Шишанов, А. В. Мякинников

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Система кругового обзора для транспортных средств на основе сверхширокополосных датчиков¹

Предложена конфигурация радиолокационной системы кругового обзора транспортного средства на основе использования сверхширокополосных датчиков. Рассмотрены алгоритмы определения координат объектов. Получены оценки точности измерения координат.

Сверхширокополосные датчики, измерение координат, линии положения, точность оценивания, "слепая" зона

В конце XX в. сформировался развивающийся рынок автомобильных радиолокационных систем. Производители транспортных средств используют радиолокационные датчики в системах помощи водителю. Большинство применяемых в настоящее время автомобильных радиолокационных устройств представляют собой радары дальнего действия (до 300 м). Такие радары контролируют сектор обзора в пределах 30° впереди автомобиля² [1].

Требования к системам безопасности будущих автомобилей не могут быть выполнены с использованием только радаров дальнего действия из-за ограничений по сектору обзора, разрешающей способности по дальности и азимуту. По этой причине в настоящее время развиваются системы на основе сверхширокополосных (СШП) радаров малой дальности [2]. Для этих целей в 2004 г. Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций принял решение о выделении полосы частот 77...81 ГГц для автомобильных радаров малой дальности (до 30 м). Радары, построенные на базе СШП-датчиков, расположенных по периметру автомобиля, позволяют контролировать пространство вокруг него. Обычно используют радиолокационные датчики, антенны которых имеют диаграмму направленности шириной около 120° [2]. Координаты обнаруженных объектов определяют на основе объединения информации, полученной от разных датчиков, представляющей собой векторы измерений дальностей до целей. Система, состоящая из СШП-датчиков, формирует в реальном времени картину окружающего транспортное средство объектов, поз-

воля таким образом вмешаться в управление автомобилем при возникновении аварийной ситуации.

Принцип построения СШП-датчиков изложен в [3]. При дальнейшем анализе в настоящей статье рассмотрена система, в которой датчики излучают пачки импульсов с эффективной шириной спектра $\Delta f_{\text{эф}} = 4$ ГГц. Пачка включает 127 импульсов с периодом повторения $T_{\text{П}} = 0.25$ мкс. Это позволяет произвести стробоскопическое накопление отсчетов сигнала, соответствующих различным зонам разрешения по дальности [3], а интервал обновления информации о радиолокационной обстановке может составлять $T_{\text{обн}} = 127T_{\text{П}}N$, где N – число зон разрешения, которое при дальности обнаружения 30 м и разрешающей способности около 4 см, соответствующей указанной ширине спектра, равно 750. Таким образом, информация об обнаруженных объектах обновляется с периодом $T_{\text{обн}} = 25$ мс. В системе цифровой обработки полученных отсчетов, формируемых каждым из датчиков, предусмотрено многоканальное по частоте Доплера накопление сигналов, отраженных от движущихся объектов. При этом в зависимости от скорости движения обнаруживаемого объекта в одном из доплеровских каналов обеспечивается близкое к оптимальному накопление сигнала. При обнаружении объектов, находящихся на малом расстоянии (порядка нескольких метров) обработка сигнала доплеровскими фильтрами может быть сведена к селекции движущихся объектов при помощи системы череспериодной компенсации.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0061 от 12.02.2013 г., Постановление Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г. № 218).

² https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01183-automotive-radar-socfpga.pdf

Рассмотренная в настоящей статье радиолокационная система ближнего действия на основе СШП-датчиков с дальностью обнаружения несколько десятков метров может быть использована для обеспечения безопасности движения не только автомобилей общего пользования, но также транспортных средств специального назначения. Сюда можно отнести, например, военные транспортные средства, в которых зона обзора водителя ограничена передним сектором, а также специальные транспортные средства, работающие в условиях Арктики, где при ограниченной видимости необходимо обеспечить безопасное маневрирование среди ледяных торосов.

Своевременное обнаружение и определение координат объектов на дальностях в несколько десятков метров весьма актуально и в случае применения на автомобилях. Например, это необходимо для своевременного обнаружения пешеходов, приближающихся к проезжей части в ночное время или в условиях ограниченной видимости. Кроме того, на перекрестках необходимо отслеживать выезжающие с примыкающих дорог автомобили. Так, при выезде с второстепенной дороги в условиях тумана необходимо определить параметры движения транспортных средств, приближающихся сбоку по главной дороге.

Зона обнаружения и "слепая" зона. Для построения системы кругового обзора транспортного средства необходимо разместить СШП-датчики по периметру так, чтобы размер "слепой" зоны (области, в пределах которой цель не обнаруживается ни одним из датчиков) был минимален. Из-за конструктивных особенностей кузова автомобиля число мест для размещения СШП-датчиков ограничено. Обычно их размещают в переднем и заднем бамперах, в дверных ручках, зеркалах или крыльях.

Для определения координат целей могут использоваться известные аналитические методы решения задачи о нахождении точек пересечения линий положения [4]. При наличии в зоне обнаружения только одного объекта его координаты могут быть определены по измерениям дальностей, полученным двумя разнесенными датчиками. Однако в многоцелевой обстановке возникает неоднозначность определения координат, для устранения которой необходимо иметь измерения дальностей, полученные как минимум тремя датчиками. В связи с этим одной из актуальных задач при проектировании системы кругового обзора на основе системы датчиков является оптимизация их размещения.

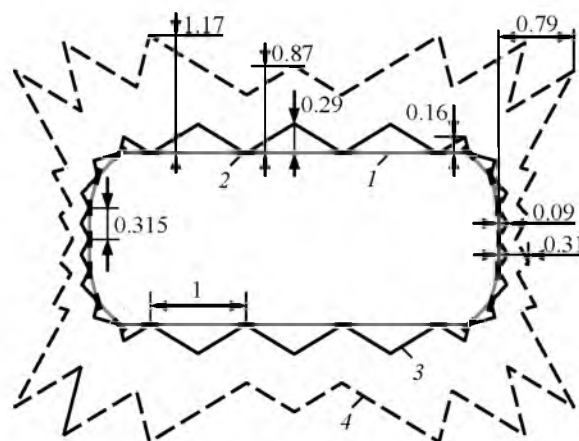


Рис. 1

На рис. 1 изображен контур машины 1 с расположенными по периметру датчиками 2. "Слепая" зона ограничена линией 3, а зона, в пределах которой определяется только дальность без возможности однозначно оценить координаты обнаруженных объектов, так как цель не попадает в область обнаружения одновременно трех СШП-датчиков, – линией 4. Размеры и расстояния указаны в метрах.

СШП-датчики на переднем и заднем бамперах расположены на расстоянии 31.5 см. По бокам автомобиля датчики расположены с шагом 1 м. Максимальная дальность действия системы определяется параметрами датчиков и обычно составляет около 30 м [5].

Аналитические методы определения координат. Для определения координат цели дальномерным методом необходимы как минимум две приемопередающие позиции, измеряющие время задержки распространения отраженного сигнала [4]. Геометрия системы при определении координат дальномерным методом показана на рис. 2, где 1, 2 – приемопередающие позиции с координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 соответственно; Ц – цель с координатами $x_{Ц}, y_{Ц}$; d – расстояние между позициями; α – угол между осью x и линией, соединяющей позиции 1 и 2; R_1 и R_2 – дальности от позиций до цели.

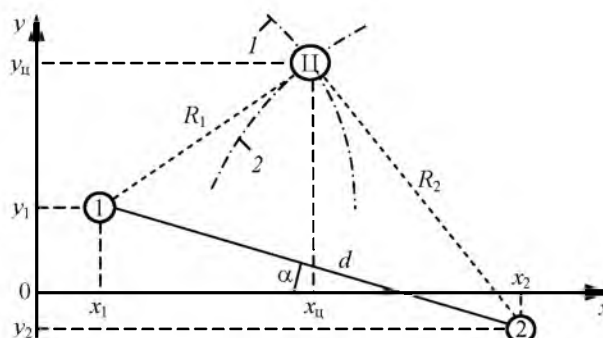


Рис. 2

Первичными измеряемыми параметрами для определения координат цели дальномерным методом являются дальности R_1 и R_2 , а линиями положения – окружности с радиусами R_1 и R_2 с центрами в местах расположения датчиков 1 и 2 соответственно (фрагменты линий положения показаны кривыми 1 и 2).

Координаты цели Ц вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x_{Ц} &= \frac{R_1^2 + d^2 - R_2^2}{2d} \cos \alpha + \\
 &+ \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 + d^2 - R_2^2}{2d} \right)^2} \sin \alpha; \\
 y_{Ц} &= \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 + d^2 - R_2^2}{2d} \right)^2} \cos \alpha - \\
 &- \frac{R_1^2 + d^2 - R_2^2}{2d} \sin \alpha.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

При наличии в зоне обнаружения радара нескольких целей дальномерный метод дает неоднозначные оценки координат. В [6] предложен способ разрешения неоднозначности, основанный на вычислении координат двумя различными методами, которым соответствуют разные линии положения, с последующим объединением полученных оценок. При этом отметки, соответствующие истинному положению целей, полученные разными методами, попадают в некоторую область вблизи истинного положения, причем размер этой области уменьшается с повышением точности измерения дальностей отдельными датчиками. Ложные отметки, полученные при использовании разных методов, оказываются разнесенными на значительно большее расстояние друг от друга.

Для определения координат двумя различными методами необходимо увеличить число приемопередающих позиций как минимум до трех. В этом случае координаты цели можно определить одновременно разностно-дальномерным, пеленгационно-дальномерным и дальномерно-суммарно-дальномерным методами [4].

На рис. 3 приведена геометрия системы, состоящей из трех датчиков. Цифрами 0, 1, 2 обозначены приемопередающие позиции с координатами $x_0, y_0; x_1, y_1; x_2, y_2$ соответственно; d_{10}, d_{20} – расстояние между приемопередающими позициями 1 и 0, 2 и 0 соответственно; Ц –

цель с координатами $x_{Ц}, y_{Ц}$; α, β – углы между осью x и линиями, соединяющим позиции 1 и 0, 2 и 0 соответственно; R_0, R_1, R_2 – расстояния до цели от позиций 0, 1 и 2 соответственно.

При вычислении координат разностно-дальномерным методом первичными измеряемыми параметрами являются разности дальностей $\Delta R_1 = R_1 - R_0$ и $\Delta R_2 = R_2 - R_0$, а линиями положения – гиперболы с фокусами в местах расположения датчиков 1 и 0 (рис. 3, а, кривая 1) и 2 и 0 (рис. 3, а, 2) [5]. Изменяемыми параметрами для пеленгационно-дальномерного метода служат разность дальностей $\Delta R = R_1 - R_2$ и дальность R_0 , а линиями положения – гиперболы с фокусами в местах расположения датчиков 1 и 2 (рис. 3, б, кривая 1) и окружность радиуса R_0 с центром в месте расположения датчика 0 (рис. 3, б, 2). При измерениях по дальномерно-суммарно-дальномерному методу фиксируются сумма дальностей

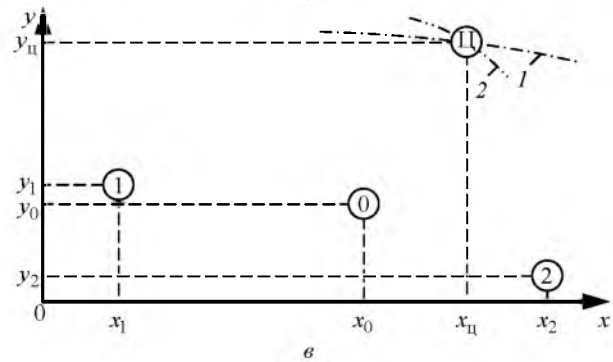
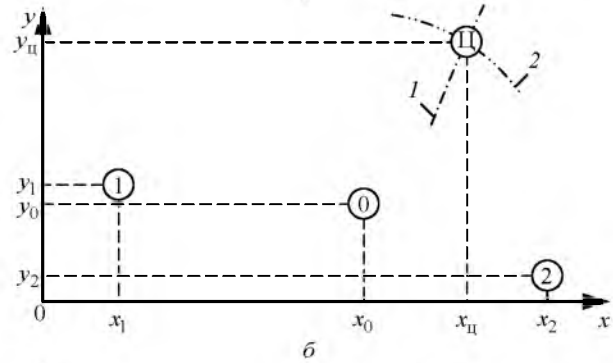
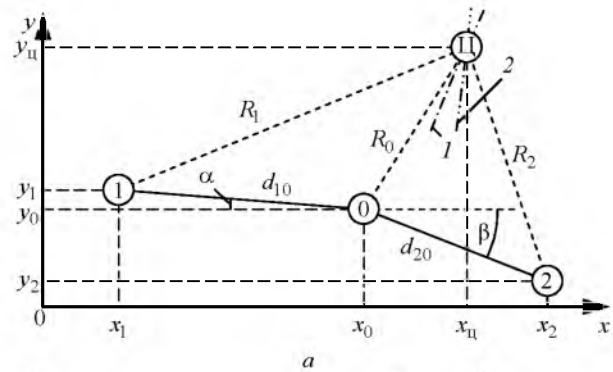


Рис. 3

$R_{\Sigma} = R_1 + R_2$ и дальность R_0 , а линиями положения являются эллипс с фокусами в местах расположения датчиков 1 и 2 (рис. 3, в, кривая 1) и окружность радиуса R_0 с центром в месте расположения датчика 0 (рис. 3, в, 2).

Координаты цели пеленгационно-дальномерным и дальномерно-суммарно-дальномерным методами определяются из решения системы уравнений

$$\begin{cases} A_1x^2 + A_2x + A_3y^2 + A_4y + A_5xy + A_6 = 0; \\ B_1x^2 + B_2x + B_3y^2 + B_4y + B_5xy + B_6 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где A_i, B_i ($i = \overline{1, 6}$) – коэффициенты, определяемые видом кривой второго порядка – линии положения.

Умножив первое уравнение системы (2) на B_1 , второе – на A_1 , а затем вычтя первое уравнение из второго, получим:

$$C_1y^2 + C_2x + C_3y + C_4xy + C_5 = 0, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} C_1 &= A_3B_1 - B_3A_1, \quad C_2 = A_2B_1 - B_2A_1, \\ C_3 &= A_4B_1 - B_4A_1, \quad C_4 = A_5B_1 - B_5A_1, \\ C_5 &= A_6B_1 - B_6A_1. \end{aligned}$$

Из (3) выразим координату x через координату y :

$$x = \frac{-y^2C_1 - yC_3 - C_5}{C_2 + yC_4}, \quad (4)$$

Подставив (4) в первое уравнение системы (2) получим уравнение, из которого определяются координаты y точек пересечения линий положения:

$$D_1y^4 + D_2y^3 + D_3y^2 + D_4y + D_5 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} D_1 &= A_1C_1^2 + A_3C_4^2 - A_1C_1C_4; \\ D_2 &= 2A_1C_1C_3 - A_2C_2C_1 - 2A_3C_4C_2 + A_4C_4^2 - \\ &\quad - A_5C_1C_2 - A_5C_3C_4; \\ D_3 &= 2A_1C_1C_5 - A_2C_1C_2 + A_1C_3^2 - A_2C_3C_4 + \\ &\quad + A_3C_2^2 + 2A_4C_2C_4 - A_5C_2C_3 - A_5C_4C_3 + A_6C_4^2; \\ D_4 &= 2A_1C_3C_5 - A_2C_2C_3 - A_2C_4C_5 + A_4C_2^2 - \\ &\quad - A_5C_2C_5 + 2C_2C_4; \\ D_5 &= A_1C_5^2 - A_2C_2C_5 + A_6C_2^2. \end{aligned}$$

Уравнение (5) решается с помощью формул корней уравнения четвертой степени. В общем случае уравнение (5) имеет четыре решения, что с учетом (4) дает восемь пар координат (x, y) . Выбор из полученных решений истинных координат цели обеспечивается объединением результатов измерений различными методами.

Точность оценивания координат. Определим среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок нахождения координат цели рассмотренными методами в предположении, что цель является точечной, а ошибки измерения дальностей – независимыми гауссовскими случайными величинами с нулевым средним.

Разложив выражения (1) и выражения для корней уравнения (5) в ряд Тейлора в окрестности их истинного значения и ограничившись членами, содержащими первые производные, получим выражения для СКО ошибок определения координат:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi_1}\right)^2 \sigma_{\xi_1}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \xi_2}\right)^2 \sigma_{\xi_2}^2}; \\ \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \xi_1}\right)^2 \sigma_{\xi_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi_2}\right)^2 \sigma_{\xi_2}^2}, \end{aligned}$$

где $\partial x/\partial \xi_1, \partial x/\partial \xi_2, \partial y/\partial \xi_1, \partial y/\partial \xi_2$ – частные производные координат x и y по измеряемым параметрам ξ_1 и ξ_2 ; $\sigma_{\xi_1}, \sigma_{\xi_2}$ – СКО ошибок определения расстояния от приемопередающей позиции до цели [7].

Дальномерным методом непосредственно измеряются координаты: $\xi_1 = R_1, \xi_2 = R_2$. Тогда $\sigma_{\xi_1} = \sigma_{\xi_2} = \sigma_R = c\sigma_{\tau}$, где c – скорость света; $\sigma_{\tau} = 1/(q_{\text{ВЫХ}} \Delta\omega_{\text{эф}})$ – потенциально достижимая точность измерения временного положения сигнала [8], причем $q_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{2E/N_0}$ – максимально возможное отношение "сигнал/шум" на выходе канала накопителя, в котором сигнал накапливается когерентно (E – энергия принятого сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности шума); $\Delta\omega_{\text{эф}}$ – эффективная ширина спектра сигнала.

При разностно-дальномерном методе

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \Delta R_1 = R_1 - R_0; \quad \xi_1 = \Delta R_1 = R_1 - R_0; \\ \xi_2 &= \Delta R_2 = R_2 - R_0; \quad \sigma_{\xi_1} = \sigma_{\xi_2} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_R^2} = \sqrt{2}c\sigma_{\tau}. \end{aligned}$$

Для пеленгационно-дальномерного метода измерения координат

$$\xi_1 = R_0; \quad \xi_2 = \Delta R = R_1 - R_2; \quad \sigma_{\xi_1} = \sigma_R = c\sigma_{\tau};$$

$$\sigma_{\xi_2} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_R^2} = \sqrt{2}c\sigma_{\tau}.$$

Для дальномерно-суммарно-дальномерного метода

$$\xi_1 = R_0; \quad \xi_2 = R_{\Sigma} = R_1 + R_2; \quad \sigma_{\xi_1} = \sigma_R = c\sigma_{\tau};$$

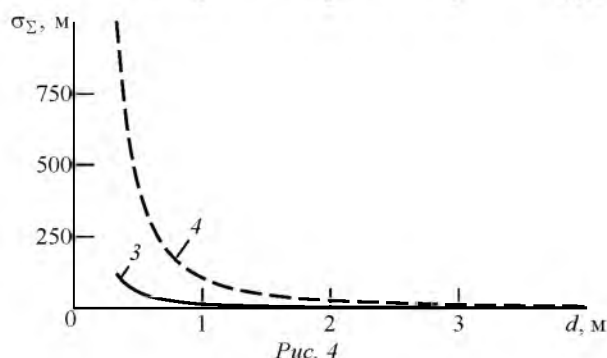
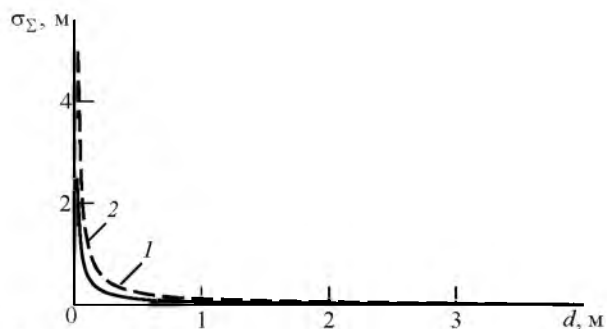


Рис. 4

$$\sigma_{\xi_2} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_R^2} = \sqrt{2}c\sigma_T.$$

На рис. 4 приведены зависимости суммарного СКО ошибок определения местоположения цели $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ описанными методами при различном расстоянии между приемопередающими позициями: 1 – дальномерным методом; 2 – пеленгационно-дальномерным; 3 – дальномерно-суммарно-дальномерным; 4 – разностно-дальномерным методом. Зависимости получены для эффективной ширины спектра сигнала $\Delta f_{\text{эф}} = 4$ ГГц при пороговом отношении "сигнал/шум" $q_{\text{вых}} = 11.39$, при котором обеспечиваются вероятности правильного обнаружения $D = 0.9$ и ложной тревоги $F = 10^{-6}$. Без снижения общности результата расчет произведен для расположения приемопередающих позиций вдоль оси x . Расстояние до цели принято равным 30 м, причем для дальномерного метода оно измерялось от центра линии, соединяющей позиции 1 и 2 (см. рис. 2), а для остальных методов – от центральной приемопередающей позиции 0 (см. рис. 3).

При расстояниях между датчиками, имеющих смысл с точки зрения практической реализации (менее 1 м), ошибки определения координат объектов при использовании дальномерно-суммарно-дальномерного и разностно-дальномерного методов на порядок превосходят дальность до цели, т. е. аномально велики (рис. 4). Высокая погрешность измерения координат объясняется тем, что

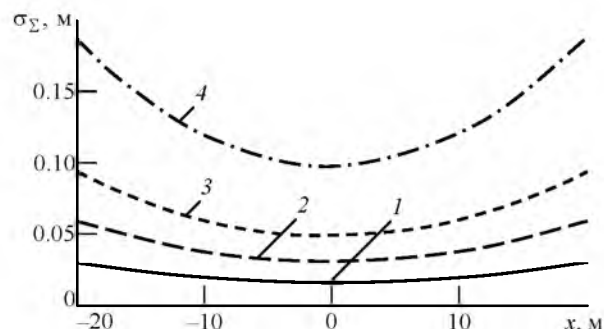


Рис. 5

угол между линиями положения в точке пересечения мал. С другой стороны, дальномерный и пеленгационно-дальномерный методы дают приемлемую точность определения координат при малом расстоянии между датчиками.

На рис. 5 приведены зависимости СКО ошибок определения координат дальномерным и пеленгационно-дальномерным способами от координаты x при $y = 20 \text{ м} = \text{const}$. Кривые 1 и 3 построены для дальномерного метода, кривые 2 и 4 – для пеленгационно-дальномерного метода при расстоянии между датчиками 1 м (характерном для размещения на бортах транспортного средства, см. рис. 1) (рис. 5, кривые 1 и 2) и 31.5 см (характерном для размещения в зонах переднего и заднего бамперов) (рис. 5, кривые 3 и 4).

Уменьшение указанного расстояния приводит к ухудшению точности оценивания координат. Следовательно, для повышения точности целесообразно использовать сигналы, полученные максимально разнесенными датчиками. Поэтому выбор датчиков, данные которых используются при оценивании координат обнаруженного объекта, должен производиться с учетом того, что с увеличением дальности до объекта он одновременно наблюдается датчиками, разнесенными на большее расстояние.

Проведенный анализ показывает, что система из СШП-датчиков, размещенных по периметру транспортного средства, при выбранных расстояниях между датчиками позволяет обнаруживать объекты, находящиеся на расстоянии более 30 см от транспортного средства (вне "слепой" зоны, см. рис. 1), а на расстоянии более 1 м (в зоне действия трех и более датчиков) оценивать координаты объектов с точностью около 10 см.

При оценке координат необходимо вычислять нелинейные функции, в частности тригонометрические. Алгоритмы их вычисления удобно реализовывать на сигнальных процессорах, например на новейшем отечественном сигнальном процессоре 1967ВЦ3Т производства фирмы "Миландр"¹.

¹ <http://milandr.ru/index.php?mact=Products,cntnt01,details,0&cntnt01productid=270&cntnt01returnid=68>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Implementing digital processing for automotive radar using SoC FPGAs. San Jose: Altera corp., 2013. 16 p.
2. Schneider M. Automotive radar – status and trends // Proc. of the German microwave conf. Ulm, Germany, 5–7 Apr. 2005. Ulm: University of Ulm, 2005. P. 144–147.
3. Пат. RU 2258942 С1 МПК G01S13/00. Способ стабилизации временного положения сверхширокополосного сигнала и локатор для мониторинга живых объектов, реализующий этот способ / А. В. Андриянов, Г. С. Икрамов, С. В. Курамшев. Оpubл. 20.08.2005. Бюл. № 23.
4. Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В. В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
5. Автомобильные радары для предотвращения столкновений и системы радиосвязи диапазона миллиметровых волн для применений интеллектуальных транспортных систем: Рекомендация МСЭ-R М. 1452-2 / Международный союз электросвязи. Женева, 2012. 9 с.
6. Myakinkov A. V., Smirnova D. M. Measurement of coordinates of the targets placed behind of radio-transparent barrier with multi-static ultra-wideband radar // Ultrawideband and ultrashort impulse signals. Sevastopol, Ukraine, 6–12 Sept. 2010. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv national university, 2010. P. 1–3.
7. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / пер. с англ.; под ред. проф. Б. Р. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с.
8. Лезин Ю. С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1986. 280 с.

S. V. Shishanov, A. V. Myakinkov

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

The system of the circular review for vehicles based on ultra-wideband sensors

Configuration of the radar system circular view for vehicles based on ultra-wideband sensors is proposed. The algorithms of coordinate determination are considered. The estimations of coordinate measurement accuracy are obtained.

Ultra-wideband sensors, coordinates measurements, position lines, estimations of accuracy, blind zone

Статья поступила в редакцию 16 марта 2015 г.