

Для цитирования: Результаты экспериментальных исследований системы локальной навигации по широкополосным источникам / А.В. Ксендзук, Е.А. Сурмин, В.В. Качесов, С.О. Жданов, К.С. Шахалов // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 5. С. DOI

**А.В. Ксендзук¹, Е.А. Сурмин¹, В.В. Качесов¹, С.О. Жданов¹,
К.С. Шахалов¹**

¹ ПАО «МАК «Вымпел»

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИСТОЧНИКАМ*

Для работы в сложных навигационных условиях предложена локальная навигационная система, основанная на обработке сигналов широкополосных источников (ГНСС, GSM, Wi-Fi, Bluetooth), комплексироваемая с инерциальной навигационной системой. Исследования системы проводились с использованием разработанного макета навигационного модуля. Описаны аналитические выражения для построения траектории движения объекта, реализованные в виде алгоритма и программного обеспечения. Для оценки достижимой точности в зависимости от параметров источников выполнено моделирование, результаты которого подтвердили возможность получения субметрового уровня точности в рассматриваемой конфигурации локальной навигационной системы. Для этой же конфигурации приведены результаты экспериментальных работ. Показано, что разработанный макет обеспечивает точность в помещении не хуже 1,5 метра и темп измерений не ниже 1 Гц.

Ключевые слова: локальная навигационная система, эффективность навигации, ошибки местоположения, комплексирование измерений

Введение

Локальные навигационные системы (ЛНС), в том числе как дополнение к навигационной системе ГЛОНАСС, позволяют определять местоположение объектов в условиях полного или частичного отсутствия навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. Область возможного применения локальных систем навигации (позиционирования): навигация автономных машин (роботов) в помещениях, включая склады, ангары, шахты и пр., управление техническими средствами на предприятиях добывающей промышленности, навигация в торговых центрах и пр.

Несмотря на наличие отдельных технических решений, проблема обеспечения устойчивой высокоточной навигации потребителей в помещениях на основе мониторинга широкополосных сигналов до конца не решена [2].

Анализ информации, приведенной в патентах и научно-технических публикациях, показал следующие варианты создания таких систем: специальные системы с пространственно-временной синхронизацией излучаемых сигналов (по принципу

действия – аналог ГНСС), системы с использованием широкополосных сигналов (Wi-Fi, Bluetooth-источники, базовые станции GSM), системы с применением инерциальной навигации и технического зрения, а также их комбинации. Сравнительные характеристики различных методов позиционирования по радиосигналам приведены в таблице.

С целью удешевления системы в целом, уменьшения ее габаритов и стоимости, в том числе за счет применения серийных образцов аппаратуры, в работе предложена система локальной навигации, в которой определение координат осуществляется по сигналам широкополосных источников, таких как сети Wi-Fi, Bluetooth, GSM. При этом система компенсирована с навигационной аппаратурой потребителей (НАП) ГНСС и с инерциальной системой навигации (ИНС), используемые широкополосные источники информации работают в штатном режиме, передавая данные потребителям, а навигация ведется по результатам оценки параметров излучаемых ими сигналов без изменения режима работы передатчиков. Как будет показано далее, такая схема, несмотря на ее простоту, позволяет

* Основные результаты работы были обсуждены на научно-технической конференции «VII Репинские чтения» в ПАО «Мак «Вымпел».

Таблица. Характеристики различных методов позиционирования

Тип системы позиционирования в режиме реального времени	Точность, м	Дистанция, м	Стоимость
Пассивные RFID	–	< 1	Низкая
ГЛОНАСС	10–15	Глобально	Низкая
Сотовая связь	100–500	В зоне покрытия	Низкая
Wi-Fi	3–5	50	Средняя
Инфракрасное	0,1	3–10	Высокая
Ультразвуковое	0,1	3–10	Высокая
Активные RFID	1–3	20–100	Средняя
NFER	0,5	20–30	Низкая
UWB	0,1	10	Высокая
CSS и SDS-TWR	3	50	Средняя

за счет комплексирования множества источников получить приемлемые показатели точности – не хуже 1–1,5 метров при достаточно большой зоне покрытия, обеспечении непрерывности навигации в помещениях и на открытых пространствах за счет комплексирования с НАП ГНСС (рис. 1).

Метод построения траектории движения объекта

В соответствии с моделью наблюдения, в области локальной навигации присутствует набор источников $i = 1, \dots, I_{\max}$, формирующих электромагнитные

поля $E_i(r, t)$. Навигационный модуль, принимая эти поля $\{E_i(r, t)\}$, формирует оценку навигационных параметров, функционально связанных с $E_i(r, t)$: $\hat{p}_i = f(E_i)$, в результате чего оцениваются собственные координаты $r_0(t)$.

Пусть имеется аналитически, численно или экспериментально полученная карта распределения $\{E_{i0}(r, t)\}$ либо $\{p_{i0}(r, t)\}$. В этом случае навигационный модуль должен решать задачу оценки положения по набору измерений $\{p_i\}$ путем поиска

$$\max_r \{\hat{p}_i(r, t)\} |_{p_{i0}(r, t)} \rightarrow r_0(t). \quad (1)$$

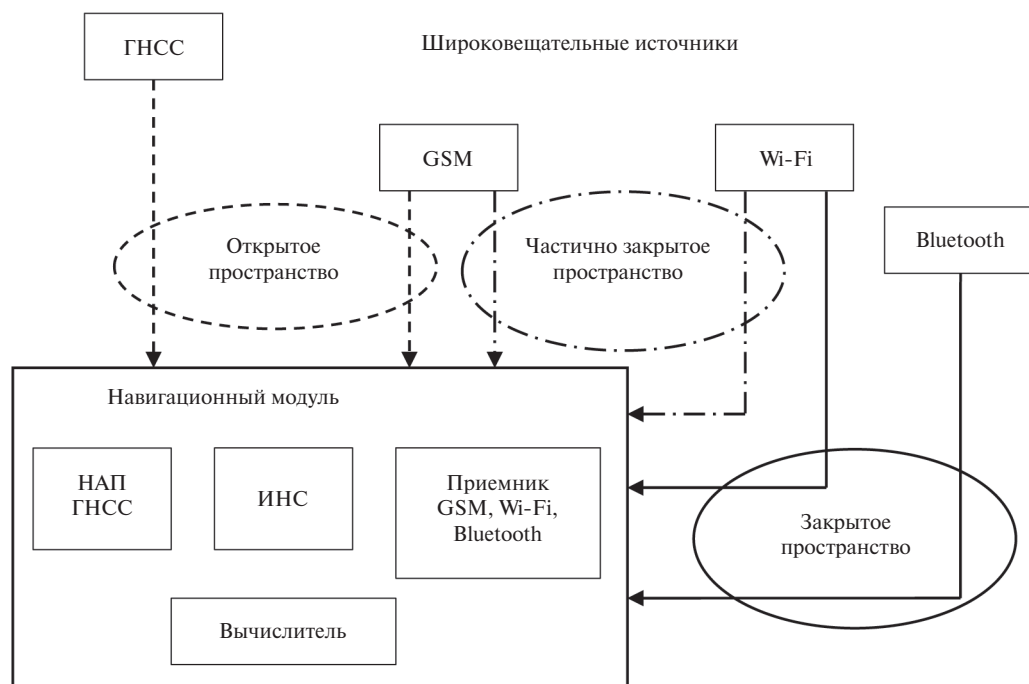


Рисунок 1. Структура локальной навигационной системы

В большинстве практических случаев в ЛНС целесообразно использовать источники, для которых $p_i(r, t) = p_i(r)$.

При решении (1) необходимо учесть точность оценок p_i , которая зависит от следующих параметров λ_i : алгоритмов обработки в навигационном модуле, параметров излучаемого сигнала, отношения сигнал/шум, зависящего в том числе от мощности источника и расстояния между ним и навигационным модулем, пространственной конфигурации и характеристик препятствий на пути распространения и пр. [3].

Оценка $\lambda_i(r_0)$ позволяет в каждой точке пространства оценить вектор точностей и сформировать по всем источникам такие области d_i , что

$$\text{Вер}\{r(\hat{p}_i) = r_0 \in d_i\} \geq z. \quad (2)$$

Использование условия (2) для набора источников $i = 1, \dots, I$ позволяет выбрать их пространственное положение и параметры сигнала (при возможности) и/или набор источников, сигнал которых используется при определении местоположения. В практических реализациях эта задача эквивалентна корреляционной схеме обработки $Y(\cdot)$ с определением пространственного объема местоположения навигационного датчика по совокупности разноточных измерений

$$\hat{r}_0 = \max_r \left\{ \sum_i Y_i(\hat{d}_i) \right\} \text{ при } Y_i(\hat{d}_i) \geq z_{Y_i}, \quad (3)$$

где $\hat{d}_i$ – оценка области местонахождения по оценке параметра p_i ; z_{Y_i} – порог результата корреляционной обработки $Y(\cdot)$, который определяется (2).

В сложных навигационных условиях решение (1) по набору источников не существует, использование (3) при учете (2) дает набор замкнутых областей, не позволяющих однозначно определить положение объекта в пространстве, и решение (3) будет иметь вид набора пространственных областей с изменяющейся формой и площадью.

При программной реализации задача определения местоположения по точечным измерениям может быть представлена поиском максимума по многомерному сечению матрицы карт распределения параметров p_i – переменной по форме многомерной областью d_i , которая зависит от $\lambda_i(r_0)$. Эти алгоритмы целесообразно использовать при начальном определении местоположения, после потери навигационного решения и при прохождении калибровочных точек.

Для повышения точности местоопределений и устранения части неоднозначностей, возникающих в результате решения (3), целесообразно построить алгоритм обработки как фильтрацию траектории $\gamma(t) = \hat{r}_0(t)$ по результатам измерений, когда принимаемый в навигационном модуле процесс $V(t)$ представляется в виде

$$V(t) = \gamma(t)e + v(t). \quad (4)$$

Использование (3) позволяет устранить аномальные ошибки измерений, что позволяет выделить источники, для которых можно полагать процесс $v(t)$ нормальным с нулевым средним и корреляционной матрицей

$$R(t, \tau) = N(t, \tau) + N_0 \delta(t - \tau). \quad (5)$$

Конкретный вид матрицы $R(t, \tau)$ определяется корреляционными свойствами ошибок оценок параметров сигналов $p(t)$ в зависимости от операций и преобразований на этапе предварительной обработки.

Логарифм функционала плотности вероятности процесса $V(t)$ при условии содержания в нем реализации $\gamma(t)$:

$$\begin{aligned} \ln p\{V(t) | \gamma(t)\} = \\ = \ln C - \frac{1}{2} \int_0^{T_k} \int_0^{T_k} \sum_{i,l=1}^L [v_i(t) - \gamma(t)] W_{ii}(t, \tau) [v_l(\tau) - \gamma(\tau)] dtd\tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где $W(t, \tau)$ – матрица, удовлетворяющая интегрально-матричному уравнению обращения

$$\int_0^{T_k} R(t, \tau) W(\tau, \sigma) d\tau = I \delta(t - \sigma), \quad (7)$$

в котором I – единичная матрица с размерностью L , равной размерности векторов в (4) и равной числу измеряемых параметров источников электромагнитного поля в навигационном модуле.

Для определения вида обратной матрицы, приравняв нулю первую функциональную (вариационную) производную по $\gamma(t)$ получим

$$\int_0^{T_k} \sum_{i,l=1}^L W_{ii}(t, \tau) [v_l(\tau) - \dot{\gamma}(\tau)] d\tau = 0, \quad (8)$$

где символом $\dot{\gamma}(\tau)$ обозначена оценка максимального правдоподобия траектории $\gamma(t)$.

Введем функцию $Q(t, \tau)$ с помощью интегрального уравнения обращения

$$\int_0^{T_k} Q(t, \tau) H(\tau, \sigma) d\tau = \delta(t - \sigma), \quad (9)$$

где

$$H(\tau, \sigma) = \sum_{i,l=1}^L W_{ii}(\tau, \sigma). \quad (10)$$

При этом из уравнения (8) следует, что оценка максимального правдоподобия траектории $\gamma(t)$ определяется уравнением

$$\dot{\gamma}(t) = \int_0^{T_k} Q(t, \tau) d\tau \int_0^{T_k} \sum_{i,l=1}^L W_{ii}(\tau, \sigma) v_l(\sigma) d\sigma. \quad (11)$$

Данная оценка – несмещенная. Кроме того,

$$\sigma_\gamma^2 = [\dot{\gamma}(t) - \gamma(t)]^2 = Q(t, t). \quad (12)$$

Результирующая точность оценки траектории зависит от статистических характеристик ошибок отдельных измерений, а также от числа L независимых измерений параметров.

Для практической реализации оператора обработки данных (11) необходимо решать уравнения обращения (7) и (8).

В рассматриваемых задачах локальной навигации обратную корреляционную матричную функцию $W(t, \tau)$ определим в структурно-подобном виде [4]

$$W(t, \tau) = -N_0^{-1}\Theta(t, \tau)N_0^{-1} + N_0^{-1}\delta(t - \tau). \quad (13)$$

где N_0^{-1} – матрица, обратная матрице N_0 ; $\Theta(t, \tau)$ – матричная функция, являющаяся решением уравнения

$$\int_0^{T_k} \Theta(t, \tau) N_0^{-1} N(\tau, \sigma) d\tau + \Theta(t, \sigma) = N(t, \sigma). \quad (14)$$

Метод решения уравнения (14) зависит от свойств функции $N(t, \tau)$. Так как в большинстве практических случаев процесс $v(i)$ состоит из стационарных и стационарно-связанных компонент, а интервал времени наблюдения T_k существенно больше их интервала корреляции, то пределы интегрирования в выражениях (7), (14) можно заменить на бесконечные и использовать для решения интегральных уравнений преобразование Фурье [5].

При этом физически реализуемый оператор фильтрации оценок максимального правдоподобия определяется выражением

$$\ddot{\gamma}(t) = \int_{-\infty}^t Q(t - \tau) d\tau \int_{-\infty}^L W_u(\tau - \sigma) v_l(\sigma) d\sigma, \quad (15)$$

а уравнение (14) принимает следующий вид

$$\int_0^{\infty} \Theta(\tau) N_0^{-1} (t - \tau) d\tau + \Theta(t) = N(t); \quad t \geq 0. \quad (16)$$

В практической реализации алгоритма использовалась оптимизация по критерию (1) с учетом ограничения (3) – максимальное отклонение оценки параметров не превышает порога, соответствующего ошибке 2 м. При этом учитывалось, что в сложных навигационных условиях решение (3) и (15) будет неоднозначным. Неоднозначность возникает как по причине аномальных оценок, вызванных низким отношением сигнал/шум, так и из-за неоднозначного характера распределения параметров электромагнитных полей. Устранение аномальных измерений за счет применения (3) позволяет использовать форму (6) и решение (11), которое с учетом (13) приводит к методу (15). Окончательно однозначное решение формируется после прохождения контрольных точек и/или после прохождения траектории, длина которой выше области неоднозначности.

Моделирование работы алгоритма

С целью определения эффективности используемого для навигации метода было проведено моделирование работы алгоритма сначала в условиях отсутствия дестабилизирующих факторов и полностью известной карты локальной области, а затем с добавлением различных дестабилизирующих факторов и оценкой их влияния. Структура и вид данных реализованного в программном виде алгоритма определения координат приведены на рис. 2.

Результат моделирования работы алгоритма показан на рис. 3. Здесь приведены: пространственные карты распределения мощности различных источников в области навигации $Pi(x, y)$, траектория движения объекта $tr(x, y)$ и результат оценки ошибки определения местоположения $Err(t)$.

В результате моделирования получены зависимости ошибки при различных условиях наблюдения и дестабилизирующих факторах, выполнена оценка достижимой точности в зависимости от пространственной конфигурации источников и стабильности параметров формируемых ими сигналов.

В результате моделирования установлено, что предлагаемая система локальной навигации в рассматриваемой конфигурации из четырех широко-вещательных источников и навигационного модуля позволяет получить субметровую точность определения местоположения. Определено, что необходима отдельная задача оптимизации расположения источников, которую целесообразно решать градиентными методами [6].

Для экспериментальной проверки и оценки качества навигационного обеспечения в локальной системе был создан макет (рис. 4).

Макет локальной системы определяет собственные координаты по сигналам различных источников: точек доступа Wi-Fi, функционирующих в штатном режиме обмена информацией с потребителями, точек доступа Wi-Fi, функционирующих в режиме «маячков» (без передачи данных), сигналов Bluetooth (LE), базовых станций GSM, сигналов ГЛОНАСС. Макет обеспечивает совместную навигацию по сигналам ГНСС и локальных источников с оценкой точности по каждой системе (локальной и глобальной) и комплексированием результатов измерений в зависимости от точности определения координат.

Проведен ряд экспериментов с разработанным макетом с целью определения эффективности навигации. В рамках подготовки экспериментальных работ исследованы возможности полуавтоматического создания карт распределения параметров электромагнитных полей, варианты интерполяции и аналитического расчета результатов измерений в отдельных точках. В результате было создано программное обеспечение, позволяющее оптимальным образом в автоматическом режиме сформировать

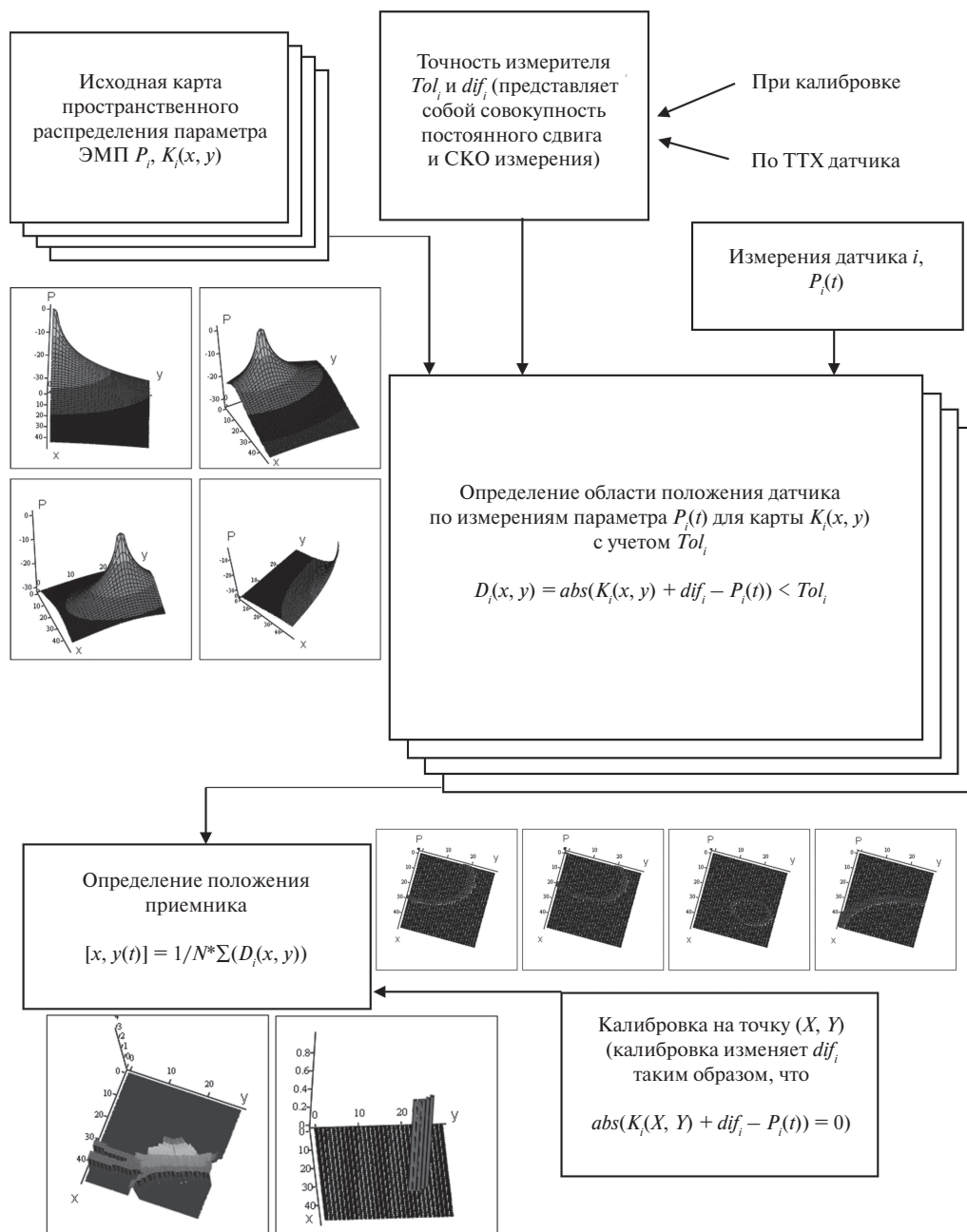


Рисунок 2. Структура алгоритма определения координат объекта

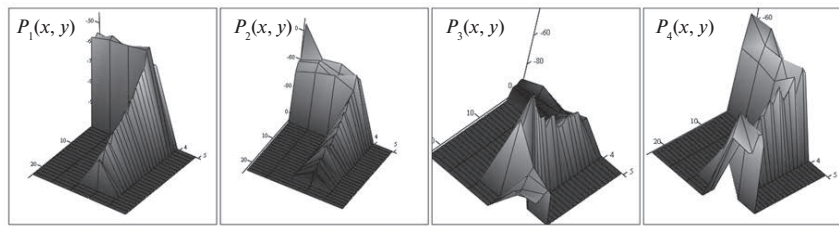
карту, необходимую для дальнейшей навигации. Пример карт различных источников в локальной области навигации показан на рис. 5.

Локальная область, в которой проводился эксперимент, содержала препятствия (стены, двери), отражающие элементы (металлические двери, элементы конструкций) и представляла собой сложную с точки зрения навигации область. В ней была введена локальная система координат и проведена разметка с помощью сетки контрольных точек.

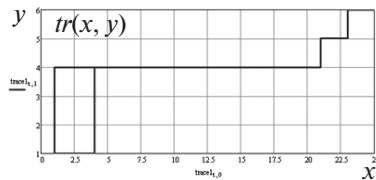
После этого осуществлялось сложное неравномерное движение со сменой направления и скорости, различными ускорениями, периодическими остановками и пр. Макет в реальном масштабе

времени отображал свое положение на карте и выполнял регистрацию времени и местоположения в файлах данных. Полученные результаты контролировались визуально в процессе движения объекта и анализировались путем обработки треков.

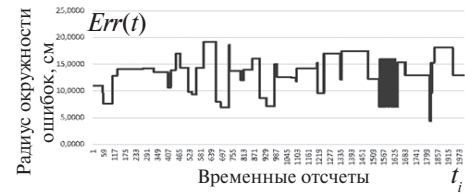
Результаты расчета мгновенных ошибок определения координат приведены на рис. 6–9. Расчет выполнялся в соответствии с методом эталонов (ГОСТ Р 57371–2016), в качестве которых использовались точки местной плоской системы координат. Макет определял координаты в местной системе, в результате анализа полученных местопределений рассчитывались отклонения координат и их проекций от эталонных значений (мгновенные ошибки),



а)



б)



в)

Рисунок 3. Вид пространственного распределения оцениваемого параметра электромагнитного поля $P_i(x, y)$ (а), траектория движения объекта $tr(x, y)$ (б) и результат оценки – ошибка определения местоположения $Err(t)$ (в)

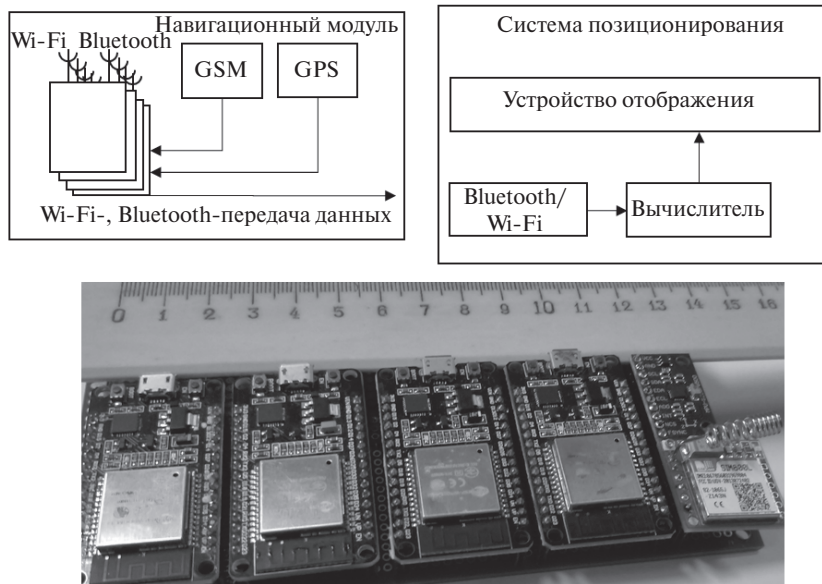


Рисунок 4. Структурная схема и внешний вид макета

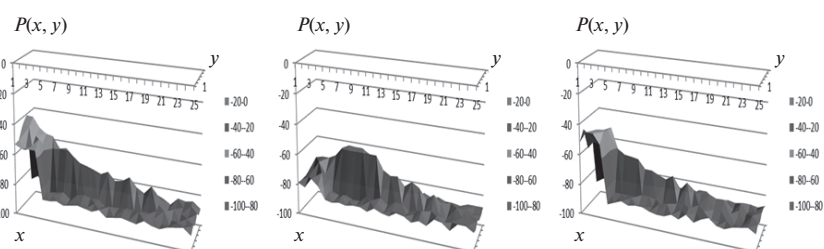


Рисунок 5. Карты распределения мощности сигнала трех источников в области локальной навигации

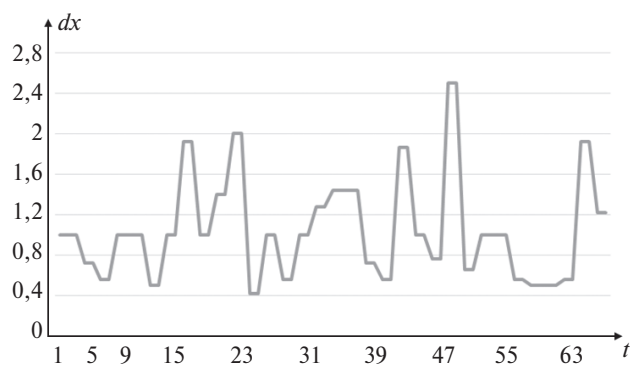


Рисунок 6. Ошибка определения координат потребителя по оси ox . Среднее значение ошибки измерения положения $dx = 1,04$ м. Среднеквадратическое отклонение измерения положения $dx = 0,38$ м

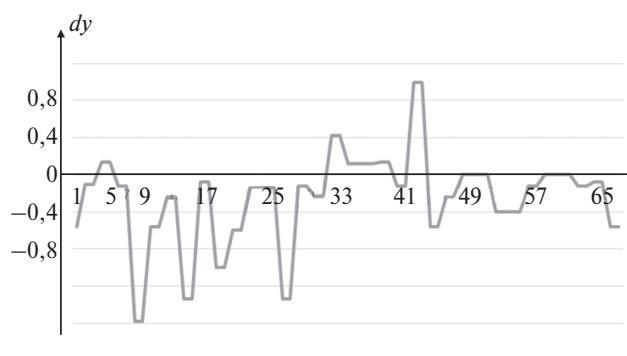


Рисунок 7. Ошибка определения координат потребителя по оси oy . Среднее значение ошибки измерения положения $dy = -0,26$ м. Среднеквадратическое отклонение измерения положения $dy = 0,36$ м

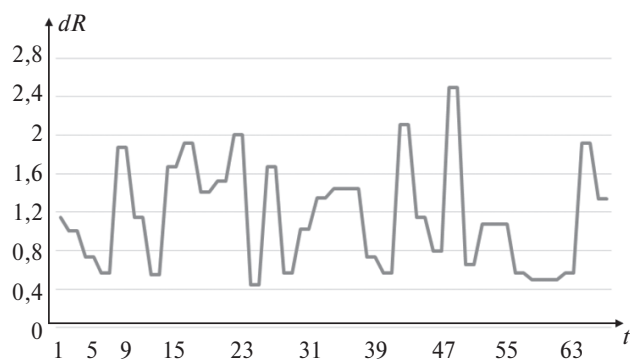


Рисунок 8. Ошибка определения координат в плоскости $ox-oy$ dR . Среднее значение ошибки измерения положения $dR = 1,16$ м. Среднеквадратическое отклонение измерения положения $dR = 0,48$ м

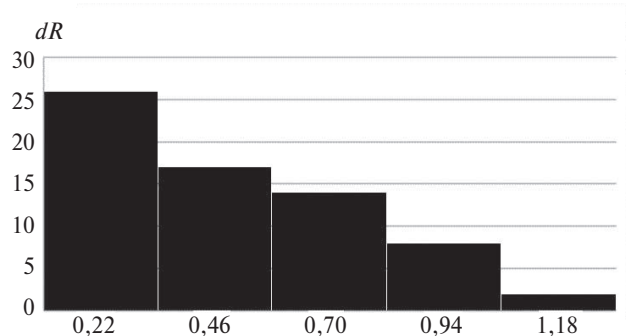


Рисунок 9. Гистограмма ошибок определения координат потребителя в плоскости $ox-oy$ dR

статистические характеристики ошибок и гистограмма распределения ошибок оценки координат.

Анализ гистограммы показывает уменьшение вероятности ошибки с увеличением ее абсолютного значения и отсутствие в выборке аномальных ошибок оценки координат. Наибольшее число

ошибок сконцентрировано в области до 0,22 м, что показывает возможность дополнительного повышения точности местоопределений за счет временной фильтрации.

Заключение

В результате экспериментальных работ были подтверждены основные результаты моделирования. Точность определения координат зависит от следующих факторов: геометрический фактор, определяемый пространственным расположением источников электромагнитного поля относительно приемника; отношение сигнал/шум в приемной аппаратуре; алгоритмы оценки физических параметров; наличие интерференции, включая многолучевое распространение сигналов; наличие помех в диапазоне работы приемных средств; методы комплексирования измерений.

Показано, что предлагаемая локальная навигационная система позволяет на открытом пространстве вблизи зданий, частично затеняющих сигналы ГНСС, получить точность выше, чем НАП ГНСС, обеспечивая точность в помещении не хуже 1,5 метра и темп измерений не меньше 1 Гц.

По результатам обработки файлов измерений установлено, что наибольшее влияние на ошибку определения местоположения оказывает смещение среднего значения относительно истинного. По результатам обработки 180 измерений в статистически независимых группах экспериментов смещение изменялось от 1,08 до 2,48 метра. Среднеквадратическое отклонение при этом изменялось от 0,34 до 0,82 метра. Анализ гистограммы ошибок определения координат показывает отсутствие аномальных ошибок и убывание вероятности ошибки с увеличением ее значения.

С учетом характера ошибок целесообразно в зоне локальной навигации в местах прохождения

критических по точности участков устанавливать маломощные передатчики, например Bluetooth LowEnergy, которые позволяют убирать это смещение (осуществлять калибровку). Также для калибровки можно использовать RFID-метки. К аналогичному выводу приходят авторы в работе [2]. Число таких дополнительных передатчиков, устраняющих смещение измерений, целесообразно определять

методами градиентного анализа [6] с учетом показателей качества работы системы навигации в области ответственности.

В дальнейших работах будут выполнены исследования комплексирования датчиков электромагнитного поля с инерциальной системой и магнитометром, в том числе за счет применения сильносвязанной и слабо связанной схем совместной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amundson I., Koutsoukos X. D. A survey on localization for mobile wireless sensor networks. In: Fuller R., Koutsoukos X. D., editors. *Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments*. Berlin Heidelberg, Springer, 2009. P. 235–254.
2. Markets&Markets. Indoor location market by positioning systems, maps and navigation, location based analytics, location based services, monitoring and emergency services. Worldwide market forecasts and analysis (2014–2019) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.researchandmarkets.com/reports/2570920> (дата обращения: 22.07.2019).
3. Фалькович С. Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флюктуационных помех. М.: Сов. радио, 1961. 312 с.
4. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. и др. Модифицированный метод синтеза антенны // Доклады Академии наук. 2004. Т. 396. № 5. С. 611–614.
5. Ксендзук А. В., Волосюк В. К. и др. Цифровая обработка сигналов и изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 544 с.
6. Ксендзук А. В., Ксензук В. М. Градиентная оптимизация области обзора бистатической РЛС. 2-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем», «РАДИОИНФОКОМ-2015». Москва, 2015. Ч. 1. С. 342–346.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ксендзук Александр Владимирович, д. т. н., заместитель начальника управления научно-технического развития – начальник центра, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: 8 (499) 152-23-74, e-mail: ks_alex@mail.ru.

Сурмин Евгений Анатольевич, ведущий инженер, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: 8 (499) 152-31-60, доб. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Качесов Владимир Васильевич, инженер, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: 8 (499) 152-31-60, доб. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Жданов Семен Олегович, инженер, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: 8 (499) 152-31-60, доб. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Шахалов Константин Сергеевич, инженер, ПАО «МАК «Вымпел», Российская Федерация, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп. 1, тел.: 8 (499) 152-31-60, доб. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

For citation: Ksendzuk A. V., Surmin E. A., Kachesov V. V., Zhdanov S. O., Shakhlov K. S. Experimental research of indoor navigation system based on broadcast signals. Issues of radio electronics, 2020, no. 5, pp. DOI

A. V. Ksendzuk, E. A. Surmin, V. V. Kachesov, S. O. Zhdanov, K. S. Shakhlov

EXPERIMENTAL RESEARCH OF INDOOR NAVIGATION SYSTEM BASED ON BROADCAST SIGNALS

Results of an experimental study of a local navigation system based on the processing signals from broadcast sources presented. The results of the development of processing algorithms for point-to-point coordinates estimation of the object are presented. The results of the development of algorithms for trajectories estimation are presented. In performed simulation the possibility of obtaining submeter position estimation accuracy in the proposed system is shown. Development results of the navigation module demonstrator are presented. The results of experimental work in difficult navigation conditions, in the presence of shading, reflections and other factors, are presented. It is shown that the developed navigation module allows in the open space near buildings which partially obscuring the satellite systems signals to obtain accuracy higher than the GNSS navigation equipment. In indoor environment in the absence of satellite navigation signals, the developed module shows positioning accuracy not worse than 1.5 meters and provides a measurement rate 1 Hz and better.

Keywords: indoor positioning system, navigation efficiency, positioning error, data fusion

REFERENCES

1. Amundson I., Koutsoukos X. D. A survey on localization for mobile wireless sensor networks. In: Fuller R., Koutsoukos X. D., editors. *Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments*. Berlin Heidelberg, Springer, 2009, pp. 235–254.

2. Markets&Markets. Indoor location market by positioning systems, maps and navigation, location based analytics, location based services, monitoring and emergency services. Worldwide market forecasts and analysis (2014–2019). Available at: <http://www.researchandmarkets.com/reports/2570920> (accessed 22.07.2019).
3. Falkovich S.E. *Priyem radiolokatsionnykh signalov na fone flyuktuatsionnykh pomekh* [Reception of radar signals against fluctuation interference]. Moscow, Sov. radio Publ., 1961, 312 p. (In Russian).
4. Volosjuk V.K. Kravchenko V.F., et al. Modified aperture synthesizing method. *Doklady Akademii nauk*, 2004, vol. 396, no. 5, pp. 611–614. (In Russian).
5. Ksendzuk A.V., Volosyuk V.K., et al. *Cifrovaya obrabotka signalov i izobrazhenij* [Digital processing of signals and images]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007, 544 p. (In Russian).
6. Ksendzuk A.V., Ksenzuk V.M. Gradient optimization of the bistatic radar field of view. (Conference proceedings) *Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikacionnykh sistem*, RADIOINFOKOM-2015. Moscow, 2015, pt. 1, pp. 342–346. (In Russian).

AUTHORS

Ksendzuk Alexander, D. Sc., deputy head of the Department of scientific and technical development – head of the center, MAC Vypel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, tel.: +7 (499) 152-23-74, e-mail: ks_alex@mail.ru.

Surmin Evgeny, leading engineer, MAC Vypel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, tel.: +7 (499) 152-31-60, ext. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Kachesov Vladimir, engineer, MAC Vypel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, tel.: +7 (499) 152-31-60, ext. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Zhdanov Semen, engineer, MAC Vypel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, tel.: +7 (499) 152-31-60, ext. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.

Shakhalov Konstantin, engineer, MAC Vypel PJSC, 10–1, Geroev Panfilovtsev St., Moscow, 125480, Russian Federation, tel.: +7 (499) 152-31-60, ext. 4–25, e-mail: vimpel215@mail.ru.