

УДК 621.396.96 - 621.397

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ГИБРИДНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМНЫХ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ ДАЛЬНОСТЕЙ И ИЗОБРАЖЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ

*Кириллов С.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: kirillov.lab@mail.ru;*

*Бердников В.М., к.т.н., доцент Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: bvm1986@mail.ru;*

*Акопов Э.В., инженер Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: akop78195@gmail.com.*

DIGITAL HYBRID POSITIONING SYSTEM OF MOBILE ROBOTS GROUP BASED ON RADIORANGING AND IMAGES OF ENVIRONMENT

Kirrilov S.N., Berdnikov V.M., Akopov E.V.

The hybrid positioning system of mobile robots group based on radioranging between robots and videoinformation from cameras. It shown, that achieved the ability to estimate coordinate robots with error around 3 m in rugged terrain and urban area.

Key words: videopositioning, group positioning, area relief contours.

Ключевые слова: видеопозиционирование, групповое позиционирование, контуры рельефа местности.

Введение

Позиционирование наземных мобильных роботизированных аппаратов (МРА) является актуальной проблемой ввиду интенсивного развития различных приложений робототехники [1, 2]. При этом возникают особенности управления, навигации и позиционирования МРА в составе группы [3].

Широко используемые решения на основе спутниковой навигации уязвимы к действию помех, особенно в городской местности, где появляются такие дополнительные отрицательные факторы как многолучевость и затенение сигналов высокими зданиями. В целях позиционирования группы МРА актуально применение взаимных измерений дальностей по радиоканалу между разными МРА группы, на основе которых можно получить информацию о расположении роботов относительно друг друга, однако при этом требуется последующая привязка к окружающей местности.

В урбанизированной среде перспективными являются системы позиционирования и навигации на основе видеоданных, благодаря таким преимуществам как автономность, малозаметность, а также относительно невысокая стоимость элементов [1, 2]. В работах [4, 5, 6] предложена система видеопозиционирования (СВП) на основе анализе контуров рельефа местности, выделяемых на изображениях окружающей среды и цифровой карты (ЦК) с указанием высот представленных на ней объектов. В этом случае основная информация, используемая при позиционировании, получается при выделении на изображениях, сигнатур контуров рельефа местности (СКРМ), представляющих векторы отсчетов $A_w(n)$, $n = 1, N$ (N – число столбцов изображения),

Представлена система гибридного позиционирования группы мобильных роботизированных аппаратов в городской местности, использующая взаимные радиои измерения дальностей совместно с видеоинформацией, полученной из бортовых видеокамер МРА. Показано, что достигается возможность определения координат группы МРА с ошибкой порядка 3 м в слабопересеченной и урбанизированной местности.

каждый элемент которых равен номеру строки содержащей искомым контур в соответствующем столбце n -того изображения [4]. При этом наличие мешающих объектов (МО), заслоняющих и искажающих контур зданий, приводит к появлению направлений, в которых невозможно определить положения контура. Для учета данного фактора вводятся сигнатуры неинформативных направлений (СНН), которые представляют вектор отсчетов $X(n)$, $n = 1, N$, (N – число столбцов изображения), причем $X(n) = 1$ в случае если n -той строке искомым контур не обнаружен $X(n) = 0$ в противном случае [5].

Преимущества данной СВП заключаются в использовании сигнатур, представляющих информацию об объектах сцены и занимающих небольшой объем, что позволит увеличить быстродействие и уменьшит требуемый размер памяти при реализации. При этом обеспечивается точность определения координат в городской местности до одного метра без использования данных по азимуту. Однако эффективное функционирование такой СВП требует выполнения условий удовлетворительной видимости, а также наличия объектов застройки в наблюдаемой сцене [4].

В известных работах не рассмотрены методы видеопозиционирования при наличии дополнительной информации о взаимном расположении объектов в группе, полученных на основе радиои измерений. При этом получение информации о контурах рельефа местности в нескольких разных точках с учетом взаимного расположе-

ния их друг относительно друга, позволит использовать меньший объем данных на каждом МРА. Это приведет к возможности работы при больших значениях доли неинформативных направлений, то есть к повышению устойчивости к действию МО и к возможности работы системы на открытой местности с редко встречающимися объектами застройки.

Цель работы: разработка алгоритма позиционирования группы МРА на основе данных об ориентации и взаимном расположении МРА, использующего информацию о контурах рельефа местности на изображениях окружающей обстановки, полученных из всех объектов группы.

Поставленная задача

Ставится задача определения координат $x_{1...W}, y_{1...W}$ МРА группы из W роботов на основе следующих исходных данных:

- расстояний между роботами группы $d_{1...W}^1, d_{1...W}^2, \dots, d_{1...W}^w, \dots, d_{1...W}^W$ (d_k^w между w -тым и k -тым роботом, измеренные при использовании радиоканала),
- изображений $I_{1...W}$, полученных при помощи одной или нескольких видеокамер;
- углов ориентации роботов (азимут $\varphi_{1...W}$, угол возвышения $\theta_{1...W}$, крен $\psi_{1...W}$), которые могут быть получены при использовании магнитометра и инклинометра.

Представленные данные передаются с каждого МРА на пункт управления, где производятся вычисления, направленные на решение данной задачи и включающее два этапа:

- Определение взаимного расположения роботов группы относительно друг друга на основе радиоизмерений (оценка относительных координат $\tilde{u}_{1...W}, \tilde{v}_{1...W}$ роботов внутри группы при использовании оценки расстояний $d_{1...W}^1, d_{1...W}^2, \dots, d_{1...W}^w, \dots, d_{1...W}^W$).

– Оценка абсолютных координат МРА группы ($x_{1...W}, y_{1...W}$) на основе информации о контурах рельефа местности, полученной из изображений, данных о ориентации МРА и цифровой карты местности. Выделение информации о контурах рельефа местности также может производиться на каждом МРА.

При оценке относительных координат МРА группы за точку отсчета принимается положение одного из роботов, где выбираются направления осей координат u и v (рис. 1) формирующих групповую систему координат $uO'v$.

Оценки ($\tilde{u}_{1...W}, \tilde{v}_{1...W}$) производится при решении системы нелинейных уравнений, связывающей расстояния между МРА и их относительные координаты:

$$\begin{cases} \sqrt{(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)^2 + (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2)^2} = d_1^2, \\ \dots \\ \sqrt{(\tilde{x}_w - \tilde{x}_k)^2 + (\tilde{y}_w - \tilde{y}_k)^2} = d_w^k, \\ \dots \\ \sqrt{(\tilde{x}_W - \tilde{x}_{W-1})^2 + (\tilde{y}_W - \tilde{y}_{W-1})^2} = d_W^{W-1}; \end{cases} \quad (1)$$

при использовании численных методов Ньютона, Левенберга-Марквардта и др.

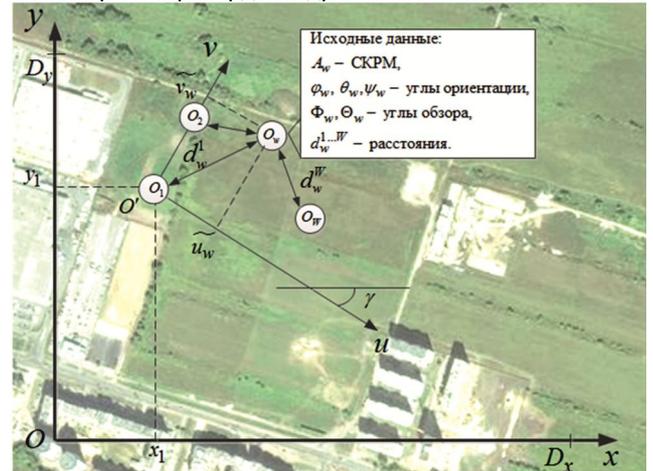


Рис. 1. Групповая и локальная система координат

Связь между абсолютными и относительными координатами группы определяется выражением:

$$\begin{cases} x_w = x_1 + u_w \cdot \cos(\gamma) + v_w \cdot \sin(\gamma), \\ y_w = y_1 - u_w \cdot \sin(\gamma) + v_w \cdot \cos(\gamma); \end{cases} \quad (2)$$

где (x_w, y_w) – координаты w -того робота в абсолютной системе координат xOy , γ – угол между xOy и $uO'v$;

(u_w, v_w) – истинные значения относительных координат w -того робота, причем

$$\begin{cases} \tilde{u}_{1...W} = u_{1...W} + \delta_{1...W}^u, \\ \tilde{v}_{1...W} = v_{1...W} + \delta_{1...W}^v; \end{cases} \quad (3)$$

где $\delta_{1...W}^u, \delta_{1...W}^v$ – ошибки оценки относительных координат. Таким образом, на этапе оценка абсолютных координат МРА требуется оценить координаты одного из роботов (x_1, y_1) и ориентацию группы в азимутальной плоскости (угол между локальной и групповой системами координат γ). Параметр γ может быть известен, на пример, при наличии прямой видимости, позволяющей измерить азимут между любыми двумя МРА группы.

Выделение сигнатур изображений местности

Выделение сигнатур $A_{1...W}$ и $X_{1...W}$ включает распознавание участков изображения $I_{1...W}$ содержащих границу зданий и фона бинаризацию и устранение мелких мешающих объектов путем морфологической обработки [5].

При этом для оценки эффективности алгоритма выделения контуров рельефа местности (АВКРМ) используются следующие параметры:

– угловая ошибка вычисления сигнатур, вычисляемая по формуле:

$$D_s = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} |A_w - A_w^t| \cdot (1 - X(n)), \quad (4)$$

где A_w^t – неискаженная СКРМ;

– доля неинформативных направлений (нормированная суммарная величина неиспользуемых столбцов изображения, возникающих в результате наличия крупных МО на изображениях):

$$S_X = \left(\sum_{n=0}^{N-1} X_n \right) / N. \quad (5)$$

В работах [4, 5, 6] рассмотрен АВКРМ, обеспечивающий получение СКРМ и СНН, имеющая угловую ошибку вычисления сигнатур, $D_s < 2,5^\circ$ при доле неинформативных направлений $S_X < 0,25$.

Оценка абсолютных координат группы

Оценка абсолютных координат группы включает определение глобального минимума функции, имеющей смысл меры различия между выделенными СКРМ и эталонными сигнатурами, построенными при использовании цифровой карты (ЦК) на основании данных об ориентации МРА.

Вид данной функции при использовании квадрата евклидовой меры представлен формулой:

$$f(x_{1...W}, y_{1...W}) = \sum_{w=1}^W \sum_{n=1}^N \left((A_w(n) - B(n, x_w, y_w, \Phi_w, \Theta_w, \varphi, \theta, \psi)) \cdot (1 - X(n)) \right)^2; \quad (6)$$

$$\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W} = \arg \min_{x_{1...W}, y_{1...W}} (f(x_{1...W}, y_{1...W})).$$

где $B(n, x_w, y_w, \Phi_w, \Theta_w, \varphi, \theta, \psi)$ – эталонная сигнатура, построенная на основе ЦК с учетом параметров видеоканера Φ_w, Θ_w и ориентации φ, θ, ψ в предположении о нахождении w -того робота в точке с координатами; $\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W}$ – оценки координат роботов группы на выходе алгоритма позиционирования.

При этом оценка минимума меры различия, представленной в формуле 6), эквивалентна определению максимума целевой функции $g(x_{1...W}, y_{1...W})$ имеющей смысл нормированного коэффициента корреляции (НКК) между СКРЗ и ЭС:

$$g(x_{1...W}, y_{1...W}) = \sum_{w=1}^W \sum_{n=1}^N \left(\frac{A_w(n) \cdot B(n, x_w, y_w, \Phi_w, \Theta_w, \varphi, \theta, \psi)}{A_w(n)^2 + (B(n, x_w, y_w, \Phi_w, \Theta_w, \varphi, \theta, \psi))^2} \right) \times (1 - X_w(n)); \quad (7)$$

$$\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W} = \arg \max_{x_{1...W}, y_{1...W}} (g(x_{1...W}, y_{1...W})).$$

С учетом связей между величинами $\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W}$ и $\tilde{u}_{1...W}, \tilde{v}_{1...W}$ приведенных в формуле (2) можно записать:

$$g(x, y, \gamma) = \sum_{w=1}^W \sum_{n=1}^N \frac{A_w(n) \cdot B(n, x, y, \gamma) \cdot (1 - X_w(n))}{A_w(n)^2 + B(n, x, y, \gamma)^2}, \quad (8)$$

$$(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{\gamma}) = \arg \max_{x, y, \gamma} (g(x, y, \gamma));$$

$$B(n, x, \gamma) = B(n, x + \tilde{u}_w \cdot \cos(\gamma) + \tilde{v}_w \cdot \sin(\gamma), y - \tilde{u}_w \cdot \sin(\gamma) + \tilde{v}_w \cdot \cos(\gamma), \Phi_w, \Theta_w, \varphi, \theta, \psi).$$

где $\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{\gamma}$ – оценки соответствующих величин x_1, y_1, γ , в последующим используемые для вычисления $(\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W})$.

На рис. 2 представлены формы нормированной к максимуму целевой функции (ЦФ) для различных значений доли неинформативных направлений S_X , при ис-

пользовании сигнатур, выделенных на одном МРА ($W=1$, рис. 2 а, б), при использовании сигнатур полученных с четырех МРА ($W=4$), при неизвестной (рис. 2 в, г) и известной (рис. 2 д, е) ориентации группы γ .

Данные зависимости получены для зоны соответствующей окраине города, представляющей открытую местность с небольшой плотностью застройки (менее 10 %) и высотными зданиями.

Как можно увидеть, целевая функция (ЦФ) является кусочно-гладкой и имеет множество побочных локальных максимумов (ПЛМ), число которого пропорционально площади зоны неопределенности. При увеличении доли неинформативных направлений (рис. 2 а-б) наблюдается рост уровня ПЛМ, из-за чего появляется вероятность ложного позиционирования $P_{л}$ (принятия одного из ПЛМ за глобальный максимум) при действии погрешностей АВКРМ. В то же время использование сигнатур из нескольких точек приводит к уменьшению количества и уровня ПЛМ (рис. 2 в), что позволяет производить позиционирование в этом случае при больших значениях доли неинформативных направлений S_X (рис. 2 г). Формы ЦФ, приведенные на рис. 2 в, г иллюстрируют, дополнительное улучшение свойств функции $g(x, y, \gamma)$, обеспечиваемое применением данных об ориентации группы (известном значении γ).

На основе исследования ЦФ для различных условий функционирования, предлагается производить определение глобального максимума в два этапа [4]:

– Поиск максимума ЦФ, на котором производится вычисление $g(x, y, \gamma)$ для каждой точки трехмерного множества Ω , включающего значения (x, y, γ) , взятые с шагом соответственно $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_\gamma)$

$$(x, y, \gamma) \in \Omega : x \in \{0, \Delta_x, 2 \cdot \Delta_x, \dots, D_x\}, \quad (9)$$

$$y \in \{0, \Delta_y, 2 \cdot \Delta_y, \dots, D_y\}, \gamma \in \{0, \Delta_\gamma, 2 \cdot \Delta_\gamma, \dots, 2 \cdot \pi\};$$

в результате чего определяется точка (x_p, y_p, γ_p) , принимаемая в качестве начального приближения для следующего этапа. При этом величины $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_\gamma)$ определяются шириной лепестка ЦФ, соответствующего полезному максимуму и необходимостью уменьшения вычислительных затрат (числа вычислений ЦФ).

– Определение глобального максимума функции $g(x, y, \gamma)$, которое производится методом градиентного спуска по параметрам (x, y, γ) в окрестности точки (x_p, y_p, γ_p) , полученной на предыдущем этапе. Таким образом, определяются значения $\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{\gamma}$, на основе которых по формуле (2) вычисляются оценки координат роботов группы на выходе предложенного алгоритма позиционирования $\tilde{x}_{1...W}, \tilde{y}_{1...W}$.

Таким образом, структурная схема варианта предложенной системы позиционирования группы МРА [7], включающая получение и обработку информации на МРА группы, передачу информации по радиоканалу, оценку относительных и абсолютных плановых координат группы на пункте управления, приведена на рис. 3.

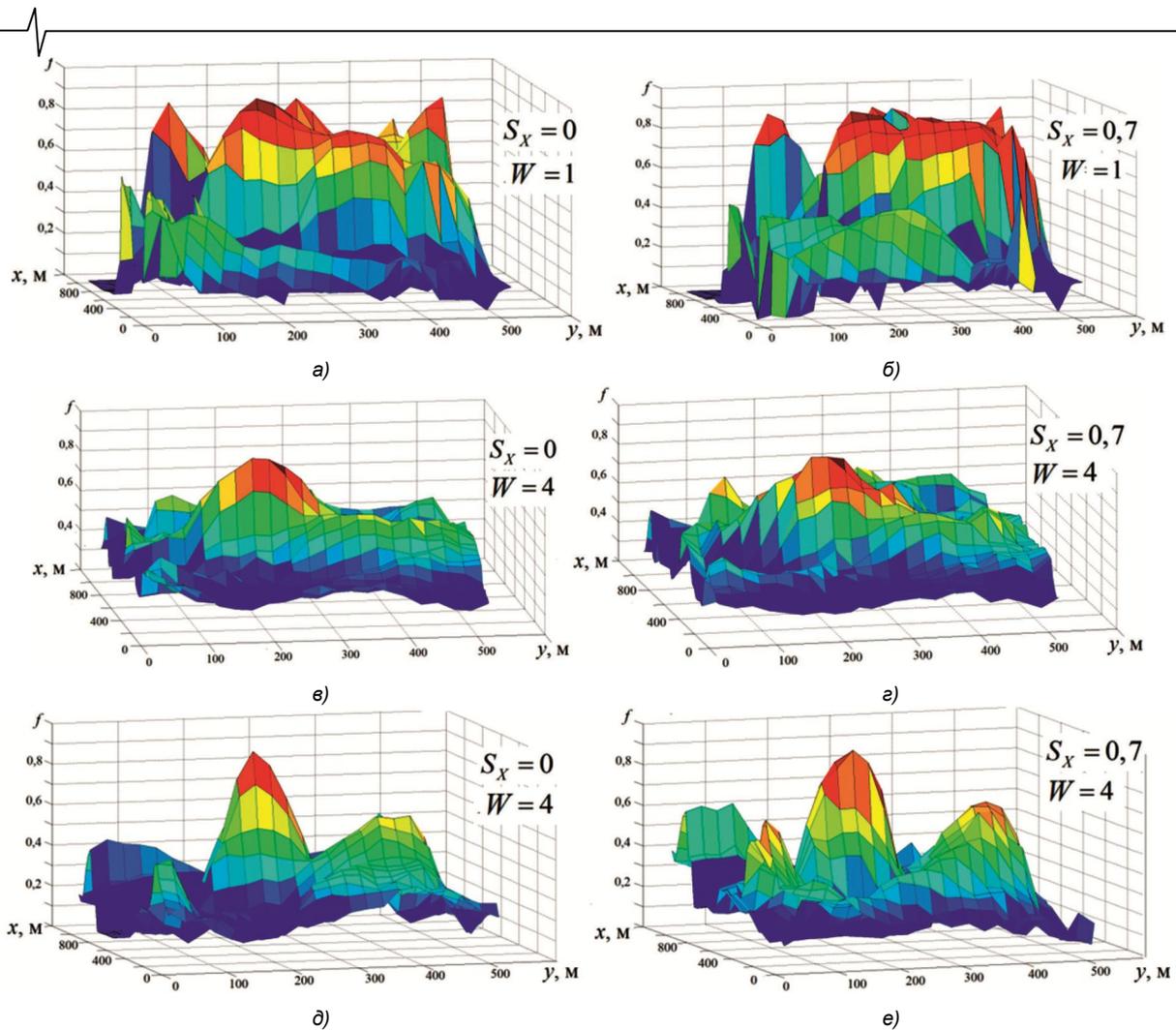


Рис. 2. Формы целевой функции

которая отражает действие погрешности СВКРМ.

Математическая модель искажающей сигнатуры определена эвристически и имеет вид:

$$A_w^H(n) = \Pi \left(\sum_{l=0}^K H_w(n+l) \right), \quad \Pi(a) = \begin{cases} a, & \text{при } a > 0, \\ 0, & \text{при } a \leq 0; \end{cases} \quad (11)$$

где H_w – вектор, содержащий значения случайной величины с нормальным распределением, K – величина окна усреднения, которая выбиралась в зависимости от характера действия МО и составляла $K = (0.01 \dots 0.05) \cdot N$.

В связи со случайным характером зависимости факта появления МО от азимута математическая модель СНН имеет вид:

$$X_n = \text{sign}(A_k^p - S_H); \quad n = 0, N-1; \quad k = \text{mod}(n, \delta); \quad (12)$$

где δ – минимальный азимутальный размер МО (в данном исследовании принято $\delta = 6^\circ$), A_k^p – случайный процесс с равномерным распределением от 0 до 1, S_H – имитируемая доля неинформативных направлений.

Экспериментальное исследование характеристик алгоритма

Для определения эффективности предполагаемого алгоритма исследовались зависимости вероятности ложного позиционирования (ЛП) от количества исполь-

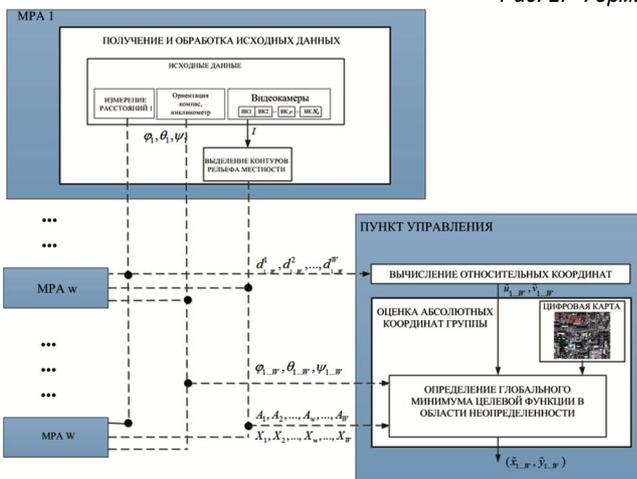


Рис. 3. Структурная схема СВП группы МРА

Модели сигнатур изображений окружающей обстановки

В качестве модели СКРМ w -того робота $A_w(n)$, полученной в определенной точке x_w, y_w при заданных углах обзора видеокамер и ориентации МРА использовались искаженные ЭС, построенные с учетом указанных аргументов:

$$A_w = B(x_w, y_w, \Phi_w, \Theta_w, \varphi_w, \theta_w, \psi_w) + A_w^H, \quad (10)$$

где A_H – искажающая сигнатура из N элементов,

зуемых роботов в группе при разных значениях доли неинформативных направлений S_x . Эксперимент проводился путем имитационного моделирования при использовании цифровой карты участка городской местности площадью $S = 1,2$ кв. км. При этом исследовался набор из $N_T = 10$ конфигураций группы, включающей до $W = 4$ роботов, расположение которых выбиралось случайно, но таким образом, что расстоянию между любыми двумя удовлетворяло условию $d = 30...70$ м.

Рассматривался алгоритм поиска максимума с величинами шага по координатам и углу соответственно $\Delta_x = 12$ м, $\Delta_y = 10^\circ$. При этом средняя ошибка вычисления СВКРМ принималась равной $D_s = 2,5^\circ$. Вероятность ЛП рассчитывалась как относительная частота появления значения ошибки на выходе поиска максимума ЦФ, превышающего величину шага по координатам, причем величина статистики в каждом случае составляла $N_{CT} = 500$.

На рис. 4 представлены экспериментально полученные зависимости вероятности ЛП P_L от количества используемых роботов в группе при значениях доли неинформативных направлений $S_x = \{0,7; 0,8; 0,9\}$, в случае отсутствия данных об ориентации группы γ и при их наличии (штриховые линии).

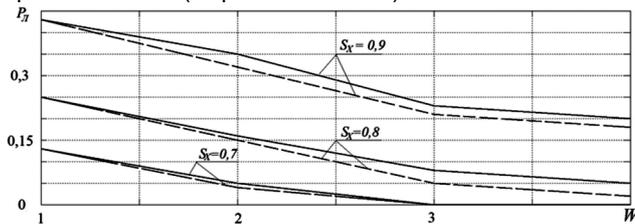


Рис. 4. Зависимости вероятности ложного позиционирования от количества используемых роботов

На основании данных зависимостей можно сделать вывод, что наличие информации об ориентации группы приводит к некоторому уменьшению вероятности ЛП, в то время как увеличение числа роботов, в которых производится получение сигнатур, приводит к значительному уменьшению этого показателя. Также можно

сделать вывод, что использование сигнатур из нескольких точек позволит компенсировать повышение доли неинформативных направлений S_x . Например, рост числа используемых роботов в группе от $W = 1$ до $W = 2$ обеспечивает увеличение допустимого значения S_x на 0,1 при фиксированном уровне вероятности ЛП равном $P_L = 0,13$. Среднеквадратическое значение ошибки вычисления координат роботов группы оставалось в пределах 3 м.

Литература

1. Zhang W., Kosecka J. "Image based localization in urban environments," in Proceedings of the International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2006.
2. Leung K.Y.K., Clark C.M., Huissoon J.P. localization in urban environment by matching ground level video images with an aerial image, USA IEEE international Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, 2008 – P. 551-556
3. Щербатов И.А., Проталинский И.О., Проталинский О.М. Управление группой роботов: компонентный подход – Информатика и системы управления. 2015. № 1. – С. 93-104.
4. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Алгоритм видеопозиционирования объектов в городской местности на основе цифровой карты – Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. – С. 3-9.
5. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Алгоритм обработки видеoinформации в интересах позиционирования объектов в городской местности, Вестник РГРТУ, 2016, №55, ISSN 1995-4565, – С. 104-110
6. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Косткин И.В., Акопов Э.В., Елютин А.В. Комплекс позиционирования роботов на основе систем технического зрения и автономной видео- и радионавигации. Радиотехника – 2016. – № 8. – С. 110-116.
7. Заявка на патент № 2016145192 от 17.11.2016 «Способ определения местоположения группы наземных роботов на основе комплексирования видеоданных и взаимных радиоизмерений дальности» Кириллов С.Н., Бердников В.М, Акопов Э.В.