

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ «ИНТЕРФЕРЕНЦИИ» ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕРНОЙ ОБЗОРНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*Ф. Р. Дзегутанов, А.А. Кирильченко*

РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша

При осмотре среды дальномерной системой мобильного робота существенной характеристикой является дискретность осмотра на базовой плоскости (или базовой прямой в цилиндрическом варианте).

Суть явления «интерференции» при повторных осмотрах заключается в том, что при достаточно медленном движении МР и соответствующей развёртке дальномерной обзорно-информационной системы положение точек повторной измерительной сети может не совпадать с измерительной сетью, полученной при предыдущем цикле осмотра. Это ведёт к уменьшению величины дискретности результирующей измерительной сети.

Рассматривается цилиндрическая постановка исследования «интерференции» при стоящем и движущемся МР для оценки горизонтальной и вертикальной результирующей дискретности осмотра.

Для трёхмерной постановки приведены варианты расчёта горизонтальной дискретности на основе теоремы о типах экстремальных точек и диаграммы Вороного.

Полученные результаты позволяют осуществлять эффективную настройку параметров дальномерной системы мобильного робота в зависимости от задачи.

### **RESEARCH OF THE PHENOMENON OF "INTERFERENCE" FOR LASER DISTANCE-MEASURING SURVEILLANCE-INFORMATION SYSTEM**

*F.R. Dzhegutanov, A.A. Kiril'chenko*

IAM by M.V. Keldysh, RAS

While examining the environment by a distance-measuring system of mobile robot the discreteness of examination in the basic plane (or basic straight line in the cylindrical version) is an essential characteristic.

The essence of "interference" phenomenon in case of repeated examinations consists in the following: with slow movement of MR and corresponding unrolling of distant viewed-informational system the position of the spots of the repeated measuring net may not coincide with the measuring net obtained during the previous examination cycle. It leads to decreasing the discreteness value of a resulting measuring net.

The cylindrical setting of interference research is investigated with a moving and stand by position of MR with a view of assessing the horizontal and vertical resulting discreteness of examination.

For the three-measured setting variants of calculation of horizontal discreteness resulted on the basis of the theorem of types of extreme points and Voronov diagram.

The obtained results allow to carry out an effective parameters setting of a distant system of a mobile robot depending on the concrete tasks.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №№ 00-01-00403, 00-15-96135, 02-01-00750, 02-07-90425, 02-01-00671
---

## **ВВЕДЕНИЕ**

Лазерные дальномерные обзорно-информационные системы (ЛДОИС) широко используются для информационного обеспечения мобильных роботов (МР). В частности в американском проекте военного назначения ALV (autonomous land vehicle), ASV (autonomous suspension vehicle) и др. Первая ЛДОИС была разработана в Ленинградском механическом институте (ныне БГТУ) в 1976 году.

В настоящее время для организации осмотра среды ЛДОИС, обычно, используется зависимость от угла развёртки в виде функции вида  $\arctg$ , что обеспечивает равномерное распределение точек измерительной сети (ИС) (измерительная сеть - множество точек пересечения измерительных лучей с некоторой базовой плоскостью) на базовой плоскости (БП). Исторически же первые варианты осмотра исследуемой поверхности ЛДОИС строились на основе равномерного вращения пот углам блока обзора. При этом дискретность осмотра на базовой плоскости

увеличивается при возрастании расстояний до точек ИС. Однако в данной работе показано, что этот начальный вариант организации осмотра ЛДОИС позволяет уменьшить дискретность осмотра на базовой плоскости за счёт явления «интерференции» дальномерных измерений. В этом случае при повторных осмотрах «новые» точки ИС заполняют промежутки между «старыми» точками ИС. За счёт этого, например, можно получить программу оптимального осмотра на стоящем МР, когда дискретность осмотра может быть сделана сколь угодно малой.

В первой части работы рассмотрен цилиндрический вариант – двумерный случай. В этом случае базовая плоскость переходит в базовую прямую, а зона обзора представляется в виде отрезка на базовой прямой. Были проведены расчеты горизонтальной и вертикальной дискретности с учётом явления «интерференции», а также рассмотрено явление асимптотически-оптимального осмотра.

Во второй части работы проведен расчёт горизонтальной дискретности осмотра с учётом явления «интерференции» для трехмерного случая. Для реализации этой задачи были разработаны алгоритм на основе теоремы о типах экстремальных точек и алгоритм построения диаграммы Вороного.

Адекватное восприятие внешней среды системы управления (СУ) МР базируется на условиях согласования (УС) информационно-двигательной активности (ИДА) МР (таблица 1).

Таблица 1.

Тип УС	Название УС	Основные параметры среды для УС
1	Сканирование ближней зоны обзора по ходу движения	Характерный минимально допустимый размер обнаруживаемых препятствий (определяет дискретность осмотра в проекции на базовую плоскость).
2	Обзор дальнего плана среды для выбора пути (предполагается, что непреодолимые препятствия могут быть двух типов: "стена" и "яма")	Минимально допустимое расстояние до "стены" при проведении сеансов измерений; Минимально возможная глубина "ямы"; Характерный размер достаточного прохода.
3	Проведение сеансов навигационных измерений для выделения текущего множества ориентиров в среде	Характерное расстояние между особенностями естественных ориентиров (например, вертикальными ребрами предметов в помещении) или между искусственными маркерами; Расстояние, характеризующее пороговое ограничение на смещение робота, при котором видимая часть среды не претерпевает "слишком значительных изменений" (это означает, что для двух последовательных сеансов обзора существуют общие ориентиры, что позволяет произвести интерпретацию как вновь появившихся, так и исчезнувших ориентиров); Видимый диаметр среды - максимальное расстояние между двумя точками среды, видимыми одна из другой (видимость понимается с учетом радиуса действия информационной системы МР).

## 1. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ

Исследования цилиндрического варианта проводились на основании данных о лазерных дальномерных для шагающих роботов [1], которые отражены в таблице 2. Также проведено моделирование пробных характеристик МР для выявления зависимостей дискретности от положения точек сканирования на базовой прямой представляющих интерес для дальнейшего исследования.

Таблица 2.

Название	V, м/с	H, м.	$\alpha_1-\alpha_2, ^\circ$	$\nu, \text{Гц}$	$\omega, ^\circ/\text{с}$
Натурный макет шагающего аппарата (НМША), разработан в НИИ ТРАНСМАШ в 1985-1991 г.г.	0,067	1,69	15-74	7	35
Лабораторный макет шагающего робота (ЛМШР), разработанный ВНИИТМ+ИПИМ 1981-1988 г.г.	0,1	1	27-70	10	35

### 1.1. Горизонтальная дискретность

Рассматривается движение робота по прямой со скоростью  $V$  и единственным углом обзора (углом развёртки  $\alpha$ , рис. 1). Пусть перед началом каждого из циклов осмотра система управления робота должна иметь информацию о расположенном перед ним участке местности. Размер этого участка определяется конструктивными особенностями робота.

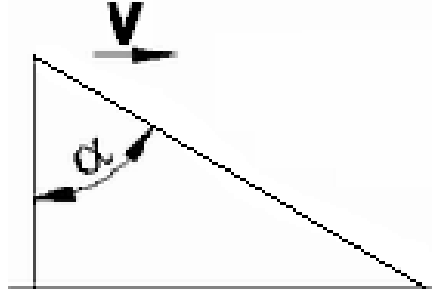


Рис. 1. Схема движения МР и ЛДОИС

Суть явления «интерференции» при повторных осмотрах заключается в том, что при достаточно медленном движении МР и соответствующей развёртке возможен такой повторный осмотр, при котором положение точек повторной измерительной сети не совпадает с измерительной сетью, полученной при предыдущем цикле осмотра, что ведёт к уменьшению величины разброса результирующей измерительной сети.

Ниже приведены необходимые формулы для исследования горизонтальной и вертикальной дискретности осмотра [2].

Пусть робот движется со скоростью  $V = \text{const}$  вдоль горизонтальной базовой линии, а измеритель дальности расположен на высоте  $H = \text{const}$  над этой линией. Согласованная периодическая развёртка с периодом  $T_0$  заключается в проведении измерений при изменении угла развёртки  $\alpha$  в пределах  $0 \leq \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ ,  $\alpha(t + T_0) = \alpha(t)$ . Зона обзора задается тремя параметрами:

$R$  - начальное расстояние до зоны обзора от робота при  $\alpha = \alpha_{\min}$  ;

$L$  - длина зоны обзора;

$l$  - длина перекрытия двух соседних зон обзора.

Если в момент  $t = 0$  измеритель наведен в точку  $x_a = R$ ,  $\alpha(0) = \alpha_{\min}$ , робот находится в точке  $x_a = 0$ , то по завершении периода развёртки в момент  $t = T_0$  наведение осуществляется в точку  $x_a = R + L - l$ ,  $\alpha(T_0) = \alpha_{\min}$ , робот находится в точке  $V \cdot T_0$ . Отсюда следует, что период развёртки определится как  $T_0 = L - l / V$ .

Могут существовать различные программы изменения угла развёртки  $\alpha(t)$ . В собственной системе координат (ССК) расстояние до точки измерения  $x_c$  по горизонтали меняется в пределах  $R_1 \leq x_c \leq R_2$ , где  $R_1 = R = H \text{tg} \alpha_{\min}$ ,  $R_2 = H \text{tg} \alpha_{\max}$ . Время подъёма измерительного луча принимается равным  $cT_0$ . Если  $c = 0.5$ , то число измерений при подъёме луча равно числу измерений при его опускании.

Пусть измерения проводятся с частотой  $\nu_0 = 1/\Delta t$ ,  $\Delta x_c$  - расстояния между измеряемыми на базовой линии точками в ССК робота, а  $\Delta x_a$  - то же расстояние в абсолютной системе координат (АСК). Тогда  $\Delta x_a = \Delta x_c + V\Delta t$ . При подъёме луча  $\Delta x_c > 0$ , при опускании  $\Delta x_c < 0$ .

Ниже развёртка предполагается монотонной, т.е. за весь период развёртки переключение знака производной угла развёртки происходит только один раз. Положим  $t = \tau\Delta t$ , где  $\tau$  - целое число в диапазоне от 1 до  $T/\Delta t$ . Измерения производятся в моменты  $t$ . Нетрудно получить, что

$$\Delta x_c(t) = a(t) \frac{x_c^2(t) + H^2}{H + x_c(t)a(t)},$$

где  $a(t) = \operatorname{tg} \Delta \alpha(t)$ ,  $\Delta \alpha(t) = \alpha(t) - \alpha(t - \Delta t)$ .

Пусть  $L_x$ ,  $0 \leq L_x \leq L$  - координата в зоне обзора текущего периода. Если  $l < L/2$ , то вся зона обзора разбивается на три участка:

А)  $0 \leq L_x \leq l$ ;

Б)  $l \leq L_x \leq L-l$ ;

В)  $L-l \leq L_x \leq L$ .

В этом случае, с учетом предыдущего и последующего периодов участки А и В осматриваются трижды - при подъеме и опускании луча на одном периоде и при подъеме луча на следующем периоде. На участке же Б луч измерений гарантированно проходит только один раз.

Пусть  $\sigma = l/L > 0.5$ . Тогда нетрудно видеть, что число периодов, в течение которых осматривается данная точка в АСК, равно  $\left[ (1-\sigma)^{-1} \right]$ , где  $[.]$  - целая часть.

Перейдем теперь к рассмотрению наиболее часто встречающегося и наиболее простого в реализации типа развертки - развертки с постоянной скоростью по углу обзора. В этом случае  $\alpha = \pm \omega_0 t$ ,  $c = 0.5$ . Отсюда следует, что

$$\omega_0 = \frac{2V}{L-1} \operatorname{arctg} \frac{(L+1)H}{2H^2 + 2R^2 + R(L+1)}.$$

При других типах разверток  $\omega_0$  сохраняет смысл средней скорости вращения угла обзора. Ясно, что заведомо  $\omega_0 < 2\pi v / (L-1)$ .

Требуемая дискретность осмотра определяется типами возможных препятствий и их допустимыми параметрами. При этом предполагается, что препятствия расположены на базовой горизонтальной линии, а измерение дальности производится абсолютно точно.

Предположим, что возможны два типа препятствий: ямы шириной не менее  $\varepsilon_0$  и вертикальные выступы высотой не менее  $h_0$ , ширина которых может быть сколь угодно малой. Чтобы гарантированно обнаружить яму, достаточно выполнения условия

$$V \Delta t + R_2 - H \frac{R_2 - H \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)}{H + R_2 \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)} \leq \varepsilon_0,$$

или в линеаризованном виде достаточна оценка:

$$\Delta t \left( V + \omega_0 \frac{H^2 + R^2}{H} \right) \leq \varepsilon_0.$$

При нарушении условия возможна ситуация, когда яма обнаружена, не будет.

Для того, чтобы обнаружить вертикальный выступ высотой  $h_0$  (независимо от ширины), достаточно выполнения условия  $\max_{\alpha} \operatorname{ctg} \alpha (V \Delta t + \delta_{\alpha}) < h_0$ , где  $\delta_{\alpha}$  - смещение  $x_c$  за счет изменения угла  $\alpha$  между измерениями, при этом при подъеме луча  $\delta_{\alpha} > 0$ , а при опускании  $\delta_{\alpha} < 0$ . Отсюда следует грубая оценка  $h_0 < H \varepsilon_0 / R$ .

Адекватность данной формулы требует дополнительных исследований методами математического моделирования.

При подъеме луча  $h_0(x_c)$  справедлива формула

$$h_0(x_c) = V \Delta t \frac{H}{x_c} + H - H^2 \frac{x_c - H \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)}{H x_c + x_c^2 \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)}.$$

Положив  $dh_0/dx_c = 0$ , получим соответственно

$$x_c = \frac{HV \Delta t \cdot \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t) + H \sqrt{HV \Delta t \cdot \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)}}{H \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t) - V \Delta t \cdot \operatorname{tg}^2(\omega_0 \Delta t)}$$

или

$$x_c \approx \sqrt{HV / \omega_0 + H^2}.$$

Во время обратного хода луча  $x_c$  уменьшается от  $R_2$  до  $R$ . Наложим при этом требование, чтобы измерения производились только в зоне обзора. Это приводит к условию

$$V\Delta t \leq H \frac{R + H \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)}{R - H \operatorname{tg}(\omega_0 \Delta t)} - R,$$

или в линеаризованной достаточной форме

$$V / \omega_0 < (H^2 + R^2) / H.$$

В этом случае смещение луча за счет изменения угла обзора  $\alpha$  превышает смещение за счет смещения робота (межрежимных переключений нет). При таком обратном просмотре в зоне 1 очевидно, что  $(\varepsilon_0)_{\min} = \delta(\alpha_{\max}) - V\Delta t$  и заведомо будет меньше, чем в случае подъема луча. Аналогичный вывод можно сделать и об  $h_0$ .

Ниже приведены результаты экспериментов по исследованию явления «интерференции» для случая горизонтальной дискретности.

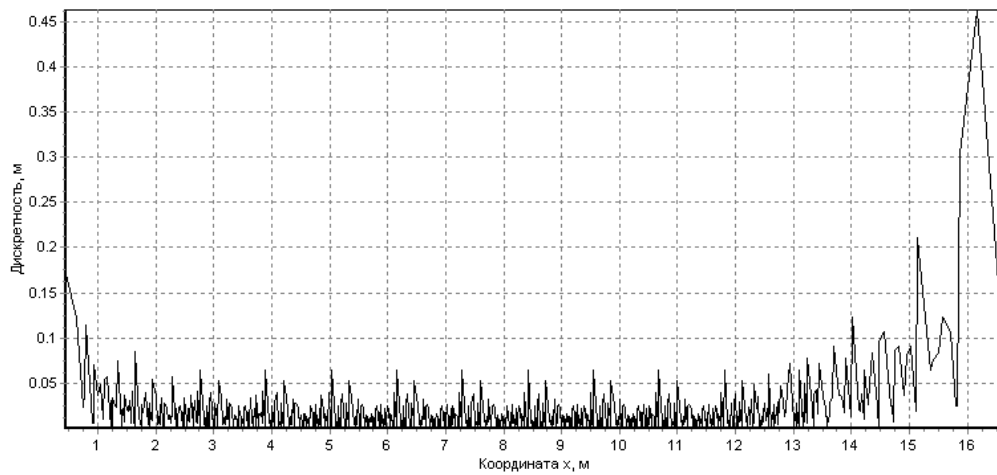


Рис. 2. НМША,  $T = 50$

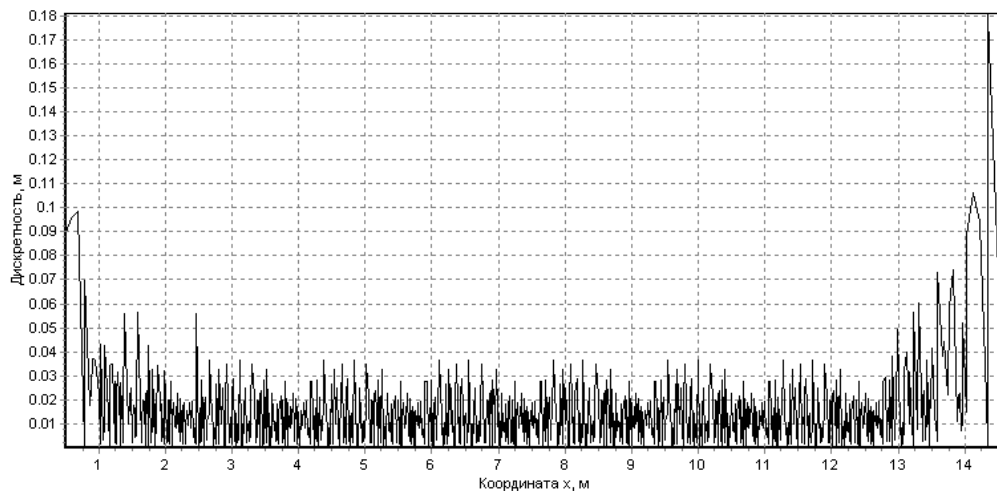


Рис. 3. ЛМШР,  $T = 50$

Учёт явления «интерференции» позволил сократить дискретность осмотра в 3-4 раза, по сравнению с расчётом без учёта явления «интерференции».

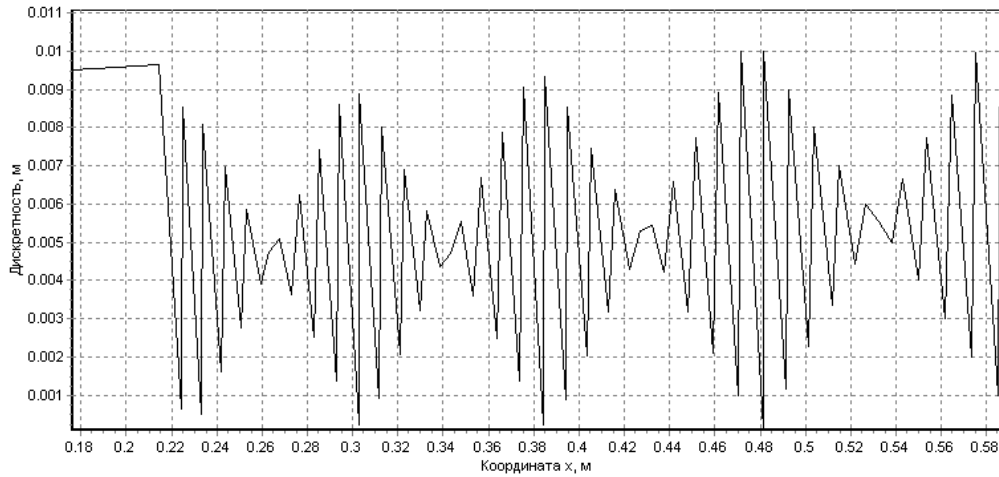


Рис. 4.  $V = 0,01$  м/с,  $H = 1$  м,  $\alpha = 10 - 30^\circ$ ,  $\nu = 20$  Гц,  $\omega = 10^\circ/\text{с}$ ,  $T = 1$

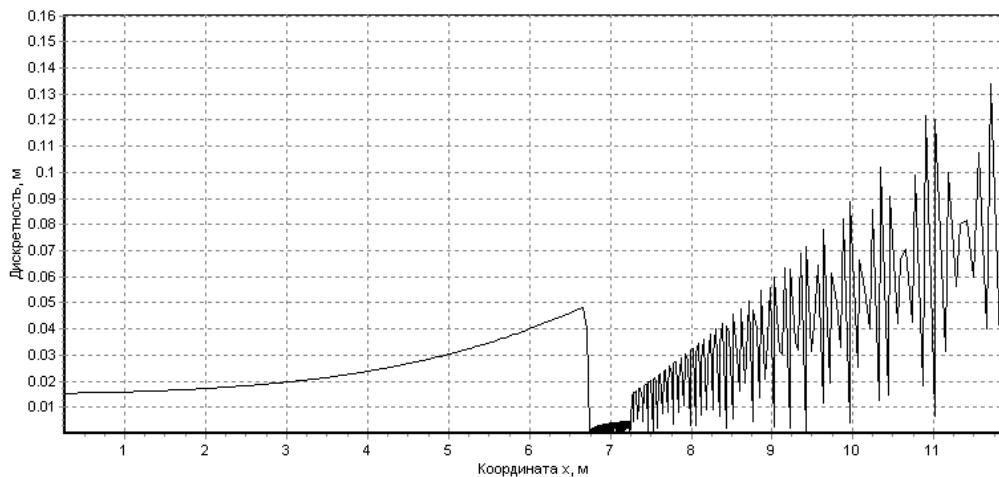


Рис. 5.  $V = 1$  м/с,  $H = 1,5$  м,  $\alpha = 10 - 80^\circ$ ,  $\nu = 100$  Гц,  $\omega = 20^\circ/\text{с}$ ,  $T = 1$

## 1.2. Вертикальная дискретность

Суть алгоритма, рассчитывающего вертикальную дискретность, заключается в следующем. В каждой точке сканирования а) производится построение «столбика» (вертикаль нулевой ширины), высота которого вычисляется по формуле  $h = \varepsilon \operatorname{ctg} \alpha$ ; б) по возможности, производится усечение ранее построенных «столбиков»; в) по окончании эксперимента находится «столбик» наибольшей длины, который и определяет вертикальную дискретность.

Так же был разработан ещё один алгоритм, отличие которого от первого заключается в шаге а). В данном случае он заменяется наложением сетки на зону движения мобильного робота. Сетка состоит из «столбиков» высоты равной высоте мобильного робота и имеет шаг  $q$ . Тогда в каждой точке сканирования необходимо проводить только лишь усечение столбиков сетки (возможно неоднократно). Положительной чертой данного алгоритма является надёжность, отрицательной – погрешность, зависящая от шага  $q$ .

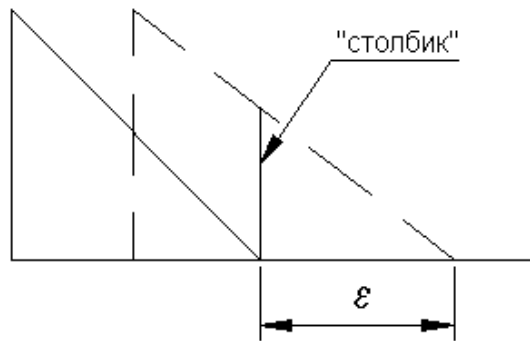


Рис. 6. Схематичное изображение «столбика»

Результаты расчёта вертикальной дискретности приведены на рис. 8.

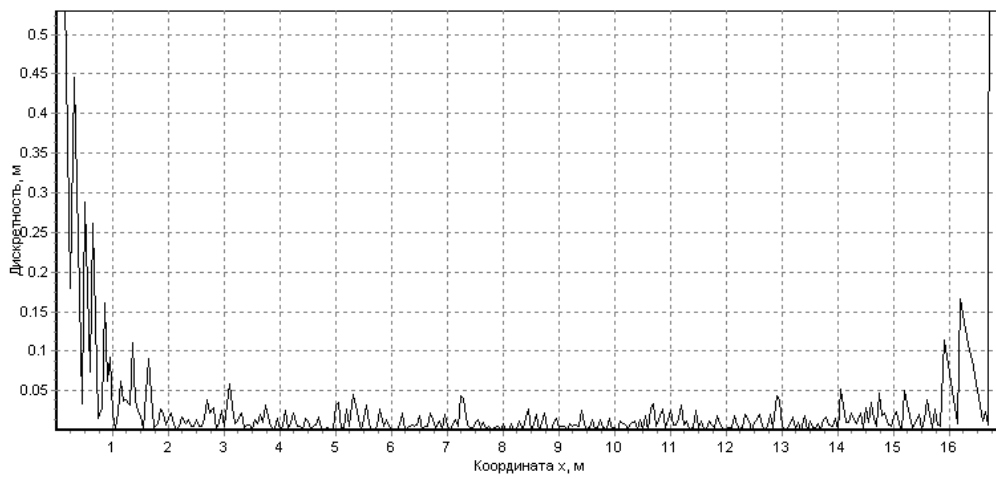


Рис. 7. НМША,  $T = 50$ ,  $a = 0,05$  м

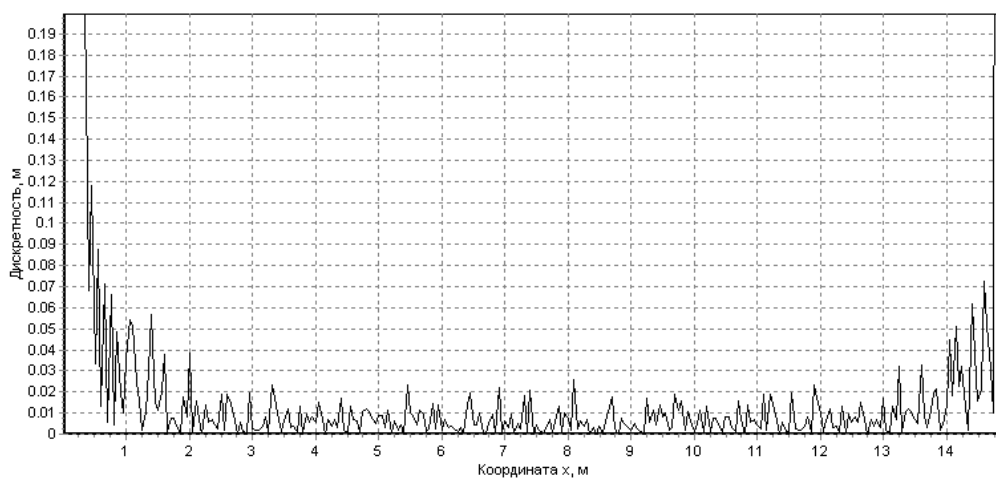


Рис. 8. ЛМША,  $T = 50$ ,  $a = 0,05$  м

### 1. 3. Понятие асимптотически-оптимального осмотра

Асимптотически-оптимальный осмотр характеризуется эффектом стремления дискретности осмотра к нулю при увеличении количества периодов осмотра. Этот эффект наблюдается только на стоящем МР и лишь в случае использования в дальномерной обзорно-информационной системе сканирующего зеркала, а не матрицы или линейки лазеров. Ниже приведены графики, иллюстрирующие описанное явление

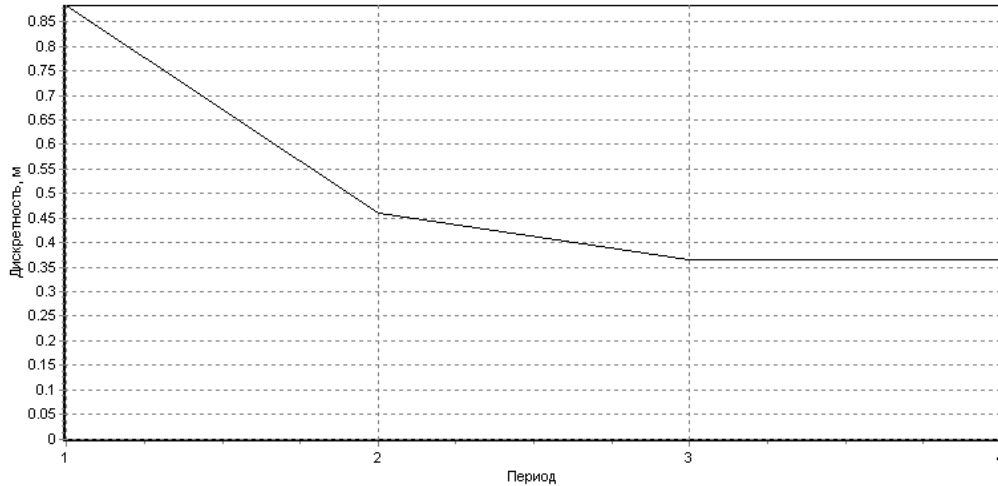


Рис. 9. НМША

На рис. 9 дискретность осмотра достигла оптимального значения на третьем периоде осмотра. Это объясняется наложением точек сканирования после третьего периода, на измерительную сеть полученную на первых трёх периодах осмотра.

Для того, чтобы не допустить подобного эффекта и достичь необходимой дискретности, следует установить значение угловой скорости равным, к примеру,  $35,1 \text{ }^\circ/\text{с}$ , что позволит избежать наложения точек сканирования и достигнуть дискретности в  $0.0085 \text{ м}$  на 174 периоде, которая уже соизмерима с конечным размером лазерного пятна в точке проведения измерения.

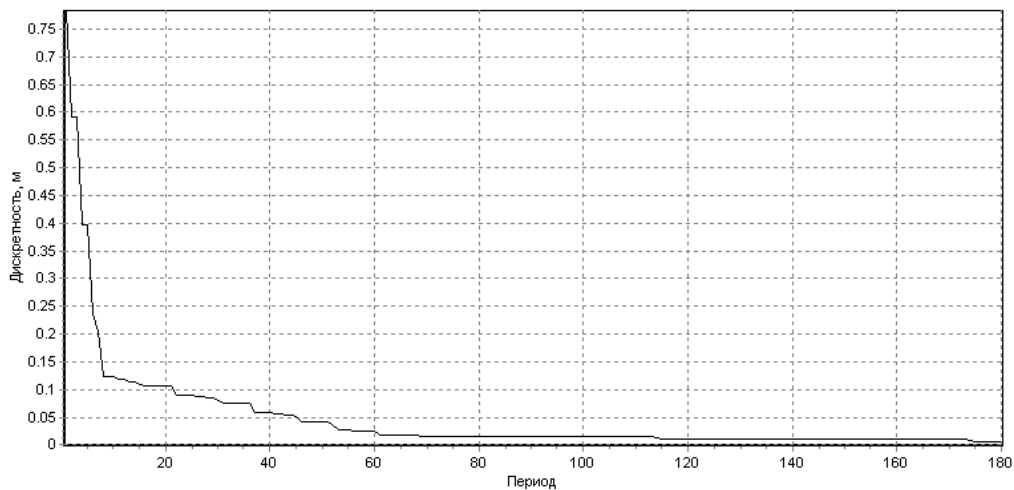


Рис. 10. НМША,  $\omega = 35,1 \text{ }^\circ/\text{с}$



Проведём аналогичные исследования для ЛМШР..

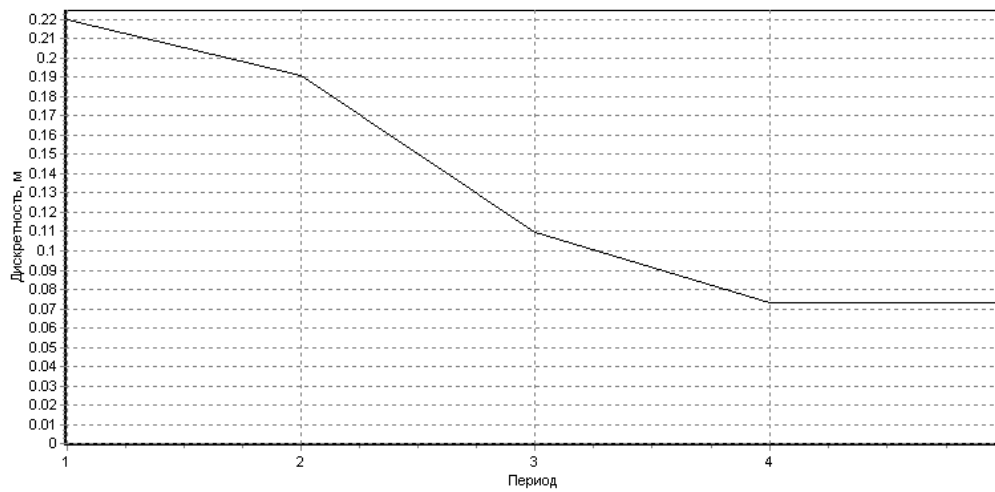


Рис.11. ЛМШР

На рис. 11 дискретность осмотра достигла оптимального значения на четвёртом периоде осмотра в связи с наложением точек сканирования на последующих периодах.

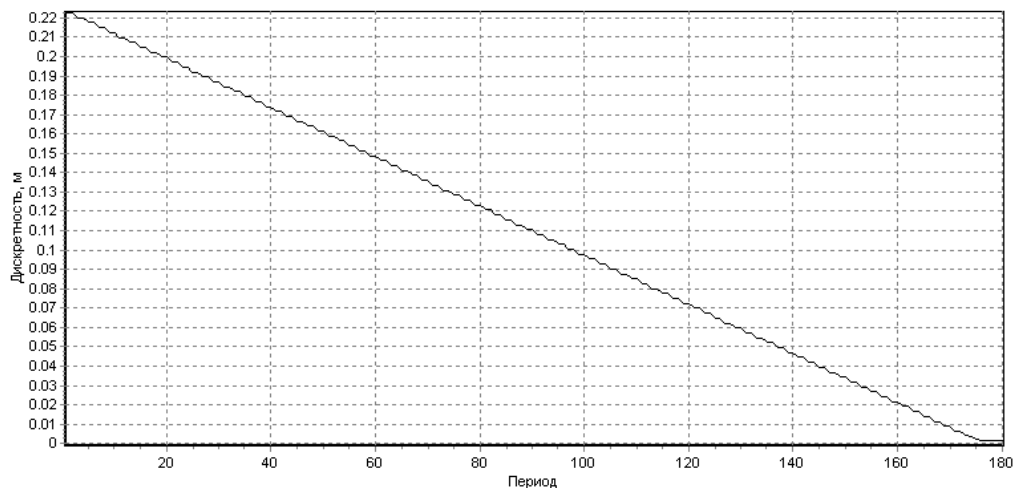


Рис.12. ЛМШР,  $\omega = 35,1$  °/с

На 169 периоде дискретность осмотра составила 0,0089 м.

## 2. РАСЧЁТ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДИСКРЕТНОСТИ НА ПЛОСКОСТИ

Методика оценки дискретности осмотра на плоскости заключается в задании области  $\Omega$  и перемещении её с определённым шагом вдоль движения измерителя.

Таким образом будет получена зависимость дискретности осмотра от положения на базовой плоскости.

В зависимости от условий задачи могут изменяться как количество перемещаемых областей  $\Omega$ , так и их размер. Например, область  $\Omega$  может определяться габаритами МР, а расположение области  $\Omega$  – расположением колёс движителя МР.

Ограничением на размер области  $\Omega$  является вычислительная сложность алгоритма, так как при увеличении области  $\Omega$  довольно быстро возрастает количество точек кандидатов в экс-

тремальные точки, что в совокупности с немалым количеством указанных областей значительно увеличивает время расчёта дискретности.

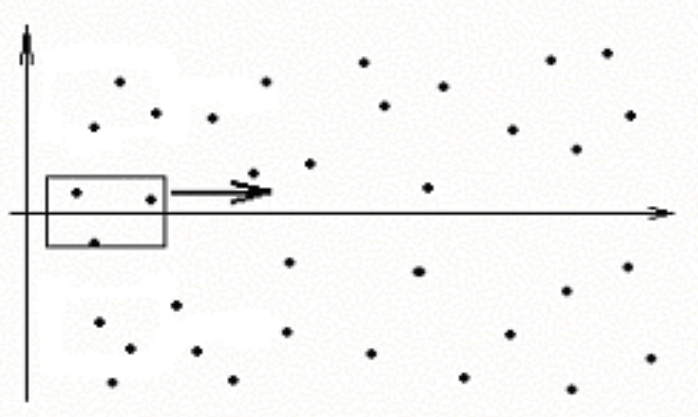


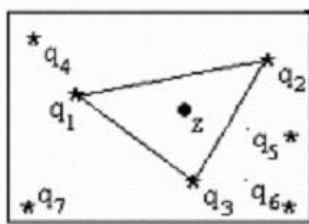
Рис. 13. Методика оценки дискретности осмотра в трёхмерном случае

Для расчёта горизонтальной дискретности осмотра на плоскости используется теорема о типах экстремальных точек (ТЭТ 3D) и алгоритм построения диаграммы Вороного.

### 2.1. Теорема о типах экстремальных точек

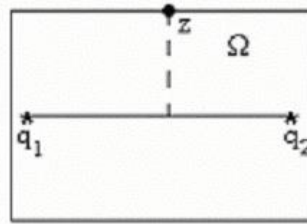
**Т е о р е м а:** Для экстремальной точки реализуем только один из трёх вариантов:

1. Если экстремальная точка находится внутри  $\Omega$ , то она является центром окружности, описанной вокруг остроугольного треугольника, точки которого входят в измерительную сеть  $Q$  (Рис. 14 а).
2. Если экстремальная точка расположена на границе  $Q$  и не является вершиной многоугольника, то она расположена на перпендикуляре, проведенном через середину отрезка, конечные точки которого входят в измерительную сеть  $Q$  (Рис. 14 б).
3. Кроме того, экстремальная точка может быть расположена в вершине многоугольника  $Q$  (Рис. 14 в).



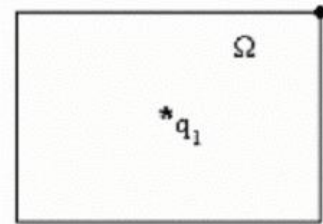
$Q = \{q_1, \dots, q_7\}$

Рис. 14 а



$Q = \{q_1, q_2\}$

Рис. 14 б



$Q = \{q_1\}$

Рис. 14 в

Приведенная теорема позволяет строить конечное множество точек, которые являются кандидатами в экстремальные точки. Обозначим это множество через  $M$ . Поскольку теорема исчерпывает все возможные типы экстремальных точек, то  $B \subseteq M$ . Из определений следует формула

$$\varepsilon_0 = \max_{m \in M} \min_{q \in Q} \|m - q\|.$$

Для получения измерительной сети имитируется движение робота с измерителем, при этом для расчёта дискретности осмотра задаётся область  $\Omega$ .

Далее, строится множество кандидатов в экстремальные точки  $M$ , которое формируется из следующих точек (в соответствии с пунктами теоремы):

1. Центры окружностей, описанных вокруг остроугольного треугольника, точки которого входят в измерительную сеть  $Q$ ;
2. Пересечение границ  $\Omega$  и перпендикуляров, проведенных через середину отрезка, конечные точки которого входят в измерительную сеть  $Q$ .
3. Вершины многоугольника  $\Omega$ .

Указанное множество формируется при помощи основных процедур алгоритма:

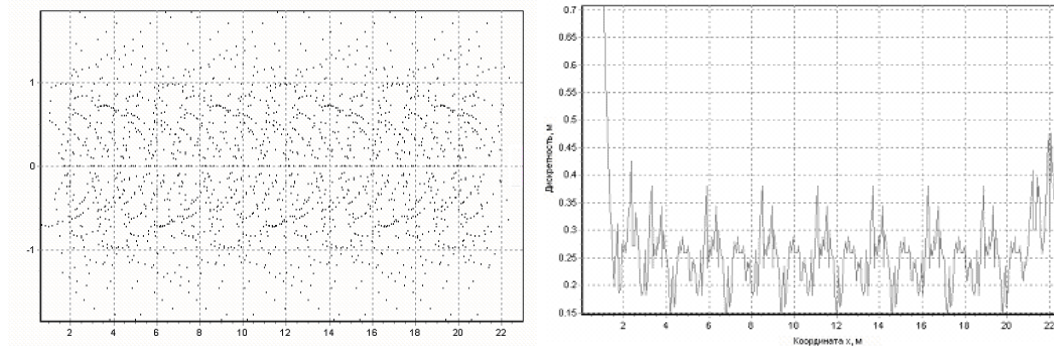
1. Нахождение центра описанной окружности,
2. Расчёт точек пересечения перпендикуляра и границ  $\omega$ ;
3. Расчёт расстояния между точками на плоскости;

После построения множества  $M$ , производится расчёт  $\varepsilon_0$  по приведенной ранее формуле

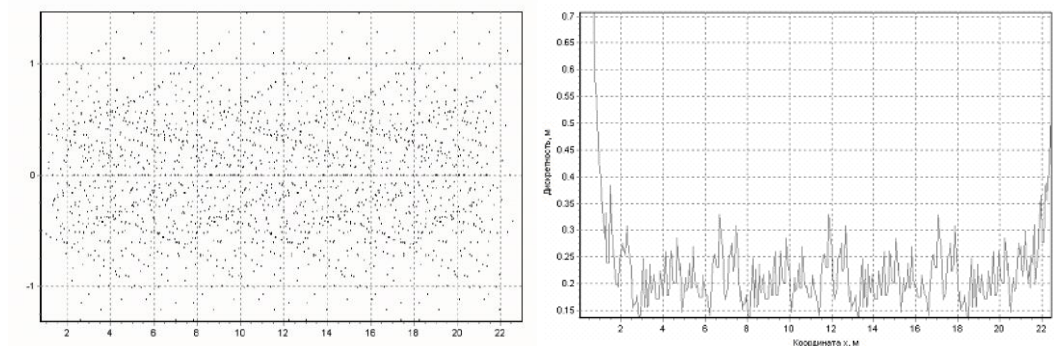
$$\varepsilon_0 = \max_{m \in M} \min_{q \in Q} \|m - q\| .$$

Таким образом, данная теорема вместе с указанной формулой продуцируют конструктивный алгоритм нахождения величины  $\varepsilon$  - сети, образуемой конечной измерительной сетью  $Q$  в зоне обзора  $\Omega$  на базовой плоскости. Этот алгоритм заключается в построении конечного множества  $M$  и определении  $\varepsilon_0$  на основе этого множества. Нетрудно видеть, что вычислительная сложность алгоритма есть  $O(N^3)$ , где  $N = |Q|$ .

На основе полученного алгоритма и при помощи описанной выше методике расчёта дискретности в трёхмерном случае был проведён ряд экспериментов. Как и в случае цилиндрического варианта явление «интерференции», вызванное повторным осмотром, сократило дискретность осмотра в 2-3 раза по сравнению с однократным осмотром. На рис. 15, 16 приведены результаты проведённых экспериментов в виде измерительных сетей и графиков дискретностей осмотра.



**Рис. 15.**  $H = 1$  м,  $V = 0,1$  м/с,  $R = 1$  м,  $L = 2$  м,  $\beta = -45 - 45^\circ$ ,  $\omega\alpha = 30^\circ/\text{с}$ ,  $\omega\beta = 45^\circ/\text{с}$ ,  $\nu = 10$  Гц,  $\Omega = 0,5 \times 0,5$  м,  $\Delta\Omega = 0,05$  м,  $T = 50$



**Рис. 16.**  $H = 1$  м,  $V = 0,1$  м/с,  $R = 1$  м,  $L = 2$  м,  $\beta = -30 - 30^\circ$ ,  $\omega\alpha = 45^\circ/\text{с}$ ,  $\omega\beta = 30^\circ/\text{с}$ ,  $\nu = 10$  Гц,  $\Omega = 0,5 \times 0,5$  м,  $\Delta\Omega = 0,05$  м,  $T = 50$

## 2.2. Асимптотически-оптимальный осмотр

Как и в случае цилиндрического варианта в трёхмерном случае имеет место асимптотически-оптимальный осмотр, т.е. стремление дискретности осмотра к нулю, при неограниченном увеличении количества периодов сканирования на стоящем МР. Такой осмотр позволяет достичь необходимой дискретности осмотра. Существование описанного эффекта, подтверждает приведённая ниже теорема из теории математического бильярда.

*Т е о р е м а: Если  $k/k_0$  иррациональное число, то любая траектория с угловым коэффициентом  $k$  всюду плотно заполняет весь прямоугольник, т.е. пересекает любой (сколь угодно малый) круг, лежащий внутри него.*

Таким образом, для получения асимптотически-оптимального осмотра в трёхмерном случае необходима иррациональность следующего выражения

$$\frac{\omega_\alpha}{\omega_\beta} \cdot \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\arctg \frac{(R+L)}{H} - \arctg \frac{R}{H}}$$

где  $\omega_\alpha$ ,  $\omega_\beta$  – угловые скорости по углам обзора,  $R$  – начальное расстояние до зоны обзора от робота при  $\alpha = \alpha_{\min}$ ,  $L$  – длина зоны обзора,  $H$  – высота МР.

## 2.3. Расчёт дискретности на основе диаграммы Вороного

Для данного набора узлов ячейка диаграммы Вороного (ДВ) определяется как подобласть расчётной области, все точки которой ближе к данному узлу, чем к остальным. Расчётная область покрывается ДВ без зазоров и перекрытий. Разбиение области на ячейки ДВ позволяет ввести структуру связей между узлами. С данным узлом связываются те узлы, ячейки ДВ которых имеют общий участок границы с ячейкой ДВ данного узла.

## 2.4. Программное обеспечение

Описанные выше методы реализованы в программном обеспечении DMSS, состоящим из следующих блоков (рис. 17):

1. Двухмерный случай
  - а. Расчёт горизонтальной дискретности
  - б. Асимптотически-оптимальный осмотр
  - в. Расчёт вертикальной дискретности
2. Трёхмерный случай
  - а. Моделирование измерительной сети
  - б. Расчёт горизонтальной дискретности
  - в. Асимптотически-оптимальный осмотр

Первый блок реализует расчёт дискретности цилиндрического варианта. Блок 2.а. позволяет производить моделирование измерительной сети для основных схем сканирования. Измерительная сеть может являться как измерительной сетью одного мобильного робота, так и совокупной измерительной сетью двух и более мобильных роботов. Расчёт дискретности полученной измерительной сети может быть произведён как в самой программе DMSS (на основе теоремы ТЭТ 3D) так и во внешних программах посредством выгрузки данных измерительной сети в файл. Данная функция, например, может быть использована для расчёта дискретности осмотра альтернативным методом на основе диаграммы Вороного посредством математического пакета MATLAB.

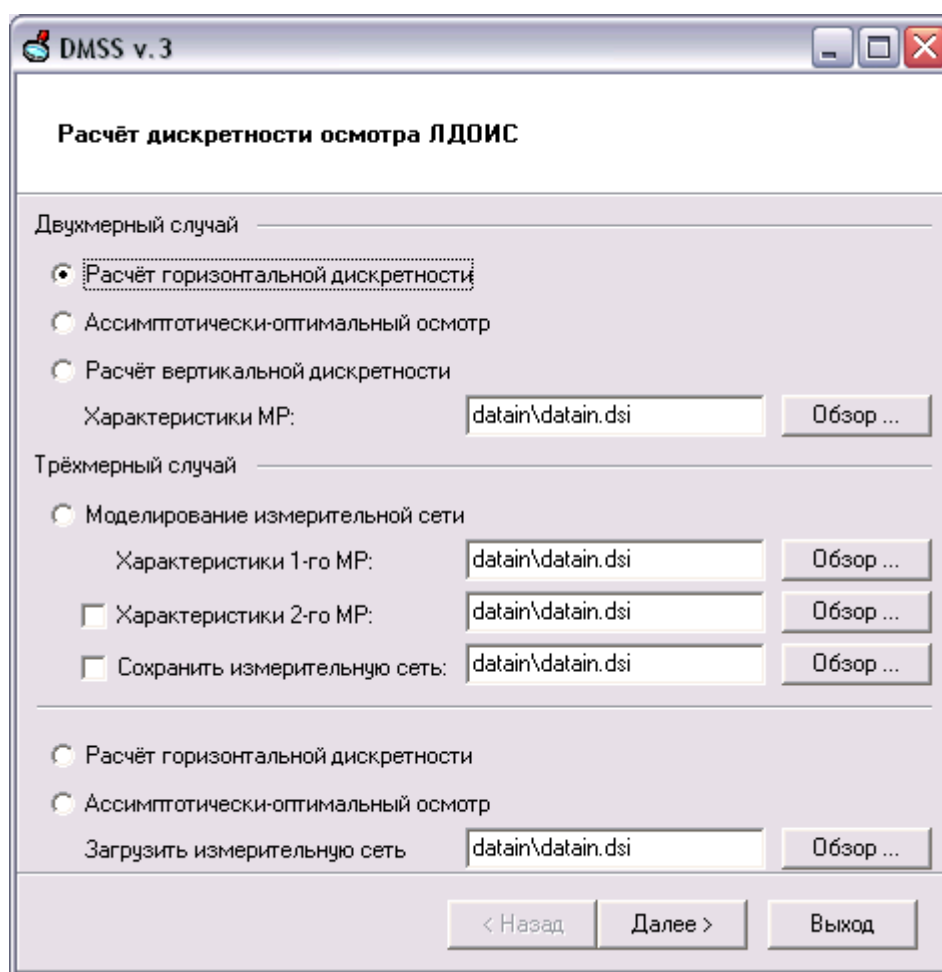


Рис. 17. Окно программы

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали численные эксперименты при «интерференции» возможно уменьшение дискретности измерений в 3-4 раза (по сравнению с максимальной дискретностью при одностороннем осмотре). При этом на стоящем МР возможно построение ассимптотически-оптимального осмотра. Приведены способы определения горизонтальной и вертикальной дискретности осмотра.

Для трёхмерного случая приведена теорема об определении горизонтальной дискретности и алгоритм построения диаграммы Вороного.

По результатам исследований может быть сделан вывод о необходимости учёта явления «интерференции» при планировании осмотра.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Okhotsimsky D.E., Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Lapshin V.V., Tolstousova V.G., Walking Machines. // "Advances in mechanics", 1992, v.15, №1-2, pp. 39-70.
2. Каргашин А.Ю., Кирильченко А.А., Ярошевский В.С. Определение характеристик дискретного осмотра среды мобильным роботом с использованием дальномерной информационной системы. // «Программирование прикладных систем», М.: Наука, 1992, с. 155-163
3. Барбашова Т.Ф., Кирильченко А.А., Ярошевский В.С., Яшкичев И.В. Условия согласования информационно-двигательных параметров мобильного робота при осмотре среды. //Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1988, №190

4. Брагин В.Б., Камынин С.С., Кирильченко А.А., Охоцимский Д.Е. и др. Системы оцувствления и адаптивные роботы. // М.: Машиностроение, 1985.
5. Bezbogov S.A., Kirilchenko A.A., Platonov A.K., Pryanichnikov V.E., Yaroshevsky V.S. Path finding problem and information support of mobile robots in uncertainty. // "2nd IFAC conf. of IAV-95, Proc.", Helsinki, 1995, pp 74-80
6. Ionova J.N., Kiril'chenko A.A., Pavlovsky V.E., Platonov A.K., Pryanichnikov V.E. Conditions for coordination the information and motion activities of mobile robots //Preprints pf the 3rd IFAC symbon Intelligent Autonomous Vehicles, Madrid, Spain, March 25-27, 1988, v.1, pp 67-52
7. Ахтёров А.В., Белоусов А.И., Джегутанов Ф.Р., Кирильченко А.А., Групповой поиск в лабиринте (Атлас расчётных случаев для задачи информационного блокирования) //М.: Препринт Ин-та прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 2002, №32.
8. Соловьёв А.В., Соловьёв Е.В., Тишкин В.Ф., Тюрина Н.Н., Фаворский А.П., Шашков М.Ю., Об одном алгоритме построения ячеек Дирихле. //М.: Препринт Ин-та прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 1985, №68
9. Гальперин Г.А., Земляков А.Н., Математический бильярд (Бильярдные задачи и смежные вопросы математики и механики).-М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 288 с.-(Б-чка «Квант». Вып. 77)