



МИНИСТЕРСТВО НА ОТБРАНАТА

ИНСТИТУТ ПО ОТБРАНА „ПРОФ. ЦВЕТАН ЛАЗАРОВ”

инж. Александър Генчов Ранов

**МОДЕЛ ЗА МАРШРУТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛ НА
ДВИЖЕНИЕТО НА АВТОНОМНА БОЙНА
ПЛАТФОРМА**

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

по докторска програма

(научна специалност)

„Автоматизирани системи за обработка на информация и управление”

Научен ръководител:

доц. д-р Александър Асенов Колев

София - 2024 г.

Дисертационният труд е приет и насочен за защита след обсъждане на Научен съвет на дирекция „Развитие на системите С4I” в Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров” с протокол № 71 / 19.12.2023 г.

Дисертационният труд съдържа въведение, четири глави с резултати и изводи към всяка една от тях, резултати и приноси на целия труд и заключение, изложени на 147 страници академичен текст, 62 фигури и 11 таблици, 12 приложения. Библиографията включва 111 наименования на български и английски език. Общият обем на дисертационния труд е 170 страници.

Номерата на главите, фигурите, таблиците, формулите и цитираната литература в автореферата съответства на това в дисертационния труд. Номерацията на използваната литература в автореферата съответства на това в дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наотчаса в зала.....на Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров”, гр. София, на открито заседание на научно жури в състав:

1. проф. д-н Георги Сотиров
2. проф. д-р Росен Илиев
3. полк. доц. д-р Севдалин Спасов
4. подп. доц. д-р Ангел Генчев
5. доц. д-р Иван Христозов

Резервни членове:

1. полк. доц. д-р Иво Радулов
2. доц. д-р Мая Божилова

Научен ръководител:

доц. д-р Александър Асенов Колев

Автор:

инж. Александър Генчов Ранов

Заглавие:

Модел за маршрутизация и контрол на движението на автономна бойна платформа

Част от резултатите в изследването са получени от автора в изпълнение на Национална научна програма „Сигурност и отбрана”, приета с РМС № 731 от 21.10.2021 г. и съгласно Споразумение № Д01-74/19.05.2022 г. между МОН и Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров“.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ

Едно от най-новите високотехнологични направления в световен обхват е създаването на автономни транспортни средства. От публично достъпни източници са известни резултати от проведени тестове и пробна експлоатация на подобни проекти в гражданската сфера. Видимо е, че първоначалните оптимистични очаквания се сблъскват с неудачи от различен характер, които правят проблематично вписването на разработените системи за автономно управление на превозни средства в съществуващите изисквания и правилници за безопасност на наземния транспорт.

Погледнато в аспекта на военните приложения, автономните платформи биха могли да бъдат продуктивни при изпълнение на определени транспортно-бойни задачи. Информация от текущи военни конфликти показва успешни опити за прилагане на бойни средства с различно ниво на автономност, опериращи във въздушна, водна среда, както и наземно базирани. В обхвата на зададената дисертационна тема, изследванията са фокусирани върху проблематиката на военното приложение на автономни наземни платформи.

ПРЕДМЕТ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Предмет на изследванията в дисертационния труд е синтезиране на модел за маршрутизация при изготвяне на транспортен план за придвижване на наземна автономна бойна платформа, както и да се предложат методи за осъществяване на контрол на движението при изпълнение на транспортна мисия.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Обект на изследванията е моделиране на процеса на маршрутизация на наземна автономна бойна платформа чрез прилагане на информационна обработка на цифрови данни за височината на земната повърхнина в обсега на изпълнение на транспортно-бойна задача. Процесите на контрол на движението стъпват на обработка на първични данни от комплект бордови сензори: за инерциална навигация, компютърно зрение, енергийна осигуреност.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Цел на дисертационния труд е да се създаде модел за маршрутизация, и да се предложат методи за контрол движението на автономна бойна платформа, с отчитане на особеностите при военно приложение.

За постигане на целта са изпълнени следните задачи:

- Да се разработи математически апарат и да се алгоритмизират процедури за маршрутизация на наземна платформа без ползване на

съществуващата пътна мрежа и при избягване на видимост от противников наблюдателен пункт;

- Да се синтезира модел за обработка на информацията при маршрутизация на автономна бойна платформа;
- Моделът да бъде валидиран в условията на тестова софтуерна среда;
- Да се предложат методи на инерциалната навигация и алгоритми за контрол на движението на автономна платформа;
- Да се представи приложение на модела при изпълнение на транспортно-бойни задачи.

II. КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

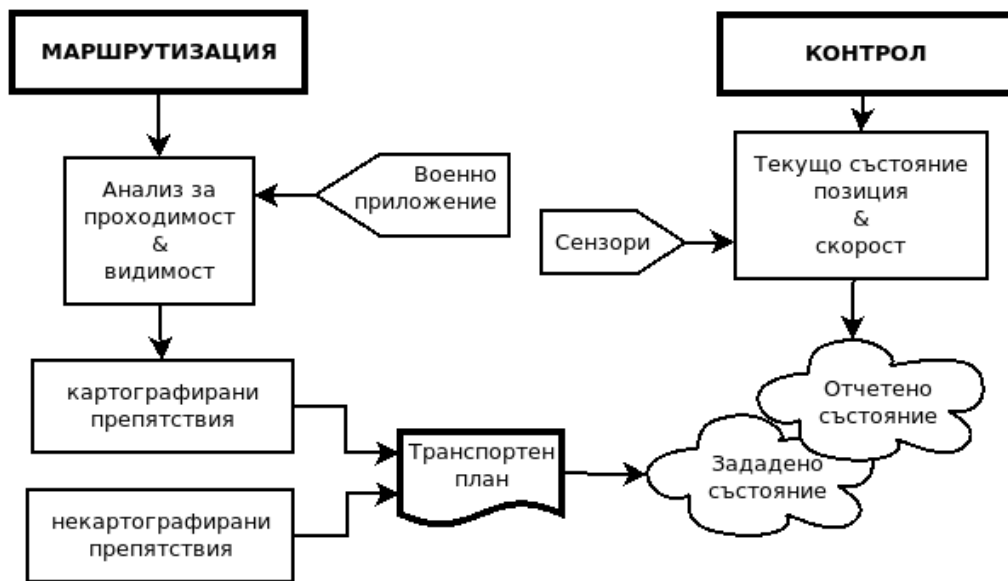
ГЛАВА 1: Проучване на съвременни постижения в теорията и практиката при прилагане на автономни платформи

Широко поставената тематика при проучването постиженията при автономните платформи може да бъде кратко представена чрез потенциалните предимства на една изградена система от автономни превозни средства: безопасност, оптимизиране на уличното движение, намалени разходи.

Навигационната система при мобилните роботи и автономни платформи е функционална при наличие на коректно определяне на текущата позиция на движещия се апарат, също и наличие на достатъчно точна и адекватна карта на работната средата. Процесът на навигация се състои от две нива на въздействие: на глобално ниво това е планиране на движението, на локално ниво това е провеждане на контрол на движението. Планирането на движение се нуждае от цифров модел на местността, или електронна карта на работната среда. Наличието на тези предпоставки позволява да се определят координатите на геометричните позиции от пътя на движение, по които мобилния робот да премине следвайки ги от изходната до зададената крайна позиция на придвижване. Контролът на движение е процес, при който се прилагат данни от вградените бордови сензори и се определя посока, при която могат да бъдат заобиколени различни непредвидени обекти, или трудни за преодоляване участъци от терена.

Военното приложение на автономните платформи е поставено на вниманието на съответните специалисти. Обекти на разглеждане в този случай в допълнение на основните предизвикателства са и някои специални изисквания. Тактико-техническите изисквания към автономните платформи с военно предназначение могат да бъдат насочени към маршрутизацията за придвижване в режим без използване на съществуваща пътна мрежа, изисквания към проходимостта, основани на констуктивни данни на машината, боен радиус и товароносимост, тегло, съответстващо на предвиден клас балистична защита и мн. други. От военна гледна точка стои въпросът за определяне на маршрут, използващ защитните свойства на местността. В едно по-

ограничено разглеждане това би било свързано с провеждане на пространствен анализ на терена с определяне на зони на видимост, от страна на известни позиции на противников наблюдател. Избягването на некартографирани препятствия е постижимо с прилагане на 3D и лидарно компютърно наблюдение, едновременно локализиране и картографиране, и други методи, близки по проблематика до системите с прилагане на изкуствен интелект. В чисто военен аспект, преимуществено би трябвало да се наблегне на т.н. пасивни методи за откриване на некартографирани препятствия, с цел минимизиране на демаскиращите признаци. Такъв метод, въпреки известни ограничения е прилагане на стереокамера и софтуерни решения за компютърно зрение.



Фиг. 1.7. Обобщена структура на изследванията

Извършеното проучване на известни подходи за създаване на автономни системи дава общ поглед върху проблематиката. Възможна е приблизителна оценка на необходимия за водене на пълноценни изследвания научно-технически ресурс. Поставени са ограничения при разработката на дисертационния труд, в рамките на темата на настоящето научно изследване, и вземайки предвид разполагаемото материално осигуряване. Дефинирана е целта на дисертационното изследване и са поставени задачите, водещи до изпълнение на така поставената цел.

ГЛАВА 2: Проблеми и решения при маршрутизация на автономна бойна платформа

Разглеждаме подход за планиране на пътя, скрит от конкретна наблюдателна точка на вероятния противник и според тактико-техническите възможности на автономната платформа за преодоляване на наклона.

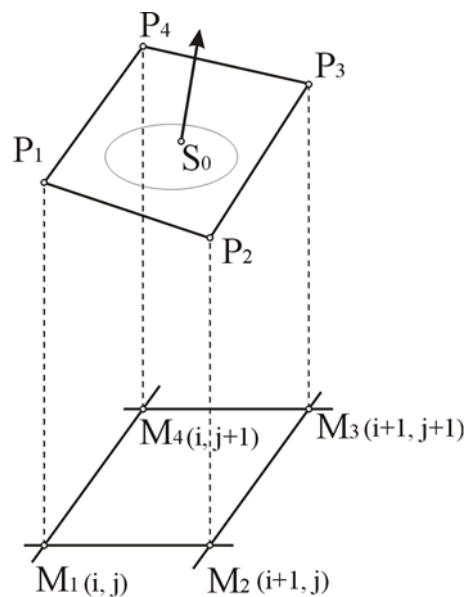
Дефинираната по-горе задача за „планиране на скрито придвижване“ предполага специфични изходни данни, сред които минималните необходими са:

- Начална позиция на автономната платформа, обозначена като Start Point (SP);
- Крайна позиция на автономната платформа, обозначена като Крайна точка (EP);
- Височина на автономната платформа над земята, Височина на платформата (PH);
- Максимален ъгъл на наклон (MSA);
- Позиция на наблюдател (OP);
- Максимално разстояние на откриване на подобен тип цел, максимален обхват на наблюдателя (MOR);
- Височина на позицията на наблюдателя над земната повърхнина (OH).

Необходимите цифрови данни за височината на земната повърхност са представени в матричен вид във формат ASCII / Binary Grid [24] и са достъпни както от публични източници [97], така и от ведомствени специализирани бази от данни.

Извършен е триизмерен анализ на цифровите данни за височината на земната повърхнина в дадена област на интерес (Area of Interest, AoI), с прилагане на алгоритми за:

- Определяне на наклона на земната повърхност в зоната на интерес;
- Определяне на зоните на видимост спрямо известна точка на наблюдател;
- Определяне на маршрут в съответствие с максималния ъгъл на наклон на автономната платформа и избягване на определените зони на видимост.



Фиг. 2.1. Цифрови данни за повърхнината и апроксимираща равнина S_0

За проверка на постигнатите резултати продуктът на цифровия анализ е преобразуван в стандартен векторен файлов формат за представяне на географски данни (ShapeFile) и е визуализиран с прилагане на специализиран софтуер с отворен код.

Предполагаме, че числовите данни за височината на земната повърхнина са представени под формата на правоъгълна двумерна матрица $\{M\}$, [18] и на фиг. 2.1 е показана една от нейните елементарна клетка с възли $M1, M2, M3, M4\}$. Предполагаме също така, че за всеки един от възлите $M1, M2, M3, M4$ ние познаваме надморската височина с достатъчна за практиката точност. Също знаем, че матрицата $\{M\}$ е геореферирана в известна координатна система. Нека общия брой на възлите в матрицата на височините да бъде $N = m \times n$, където m е броя на колоните и n е броя на редовете в двумерната матрица.

Определяне на наклона на земната повърхнина с прилагане на апроксимираща равнина

Нека елементарната клетка от повърхнината в цифровия модел да бъде определена с точките:

$$\left. \begin{array}{l} P_1(x_i, y_j, z_{i,j}) \\ P_2(x_{i+1}, y_j, z_{i+1,j}) \\ P_3(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{i+1,j+1}) \\ P_4(x_i, y_{j+1}, z_{i,j+1}) \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Необходимо е да определим нормалния вектор \vec{n} на апроксимиращата равнина $S_0\{P1, P2, P3, P4\}$.

С прилагане на метода на най-малките квадрати [45], търсената апроксимираща равнина S_0 се представя с израза:

$$S_0 \equiv z = ax + by + c, \quad (2.2)$$

И още с коефициентите a и b , за които е минимизирана функцията

$$F \equiv \sum_{k=1}^4 (aX_k + bY_k - Z_k)^2 \quad (2.3)$$

където:

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = X_4 = x_i \\ X_2 = X_3 = x_{i+1} \\ Y_1 = Y_2 = y_j \\ Y_3 = Y_4 = y_{j+1} \\ Z_1 = z_{i,j} \\ Z_2 = z_{i+1,j} \\ Z_3 = z_{i+1,j+1} \\ Z_4 = z_{i,j+1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_1 = X_4 = x_i \\ X_2 = X_3 = x_{i+1} \\ Y_1 = Y_2 = y_j \\ Y_3 = Y_4 = y_{j+1} \\ Z_1 = z_{i,j} \\ Z_2 = z_{i+1,j} \\ Z_3 = z_{i+1,j+1} \\ Z_4 = z_{i,j+1} \end{array} \quad (2.4)$$

За определяне на коефициентите a , и b за които F има минимална стойност се решава системата от уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} \equiv 2 \sum_{k=1}^4 (aX_k - bY_k - Z_k)X_k = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} \equiv 2 \sum_{k=1}^4 (aX_k - bY_k - Z_k)Y_k = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial c} \equiv 2 \sum_{k=1}^4 (aX_k - bY_k - Z_k) = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

След определяне на коефициентите a и b с прилагане на изразите (2.3), (2.4), и (2.5) ние намираме, че повърхнината (2.2) има нормален вектор

$$\vec{N} = (-a, -b, 1) \quad (2.6)$$

В резултат, ъгълът γ на наклон на равнината S_0 спрямо хоризонта се определя от израза:

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (2.7)$$

Следователно, ъгълът на земната повърхнина за изследваната елементарна клетка от цифровия модел на повърхнината в градуси, γ^{deg} се определя като:

$$\gamma^{\text{deg}} = \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \right) \frac{180}{\pi} \quad (2.8)$$

Определяне на наклона на земната повърхност с прилагане на триангулация

Нека повърхнината S да бъде определена чрез повърхнините S_1 и S_3 , които се дефинират чрез триъгълниците $P_1P_2P_4$ и $P_3P_4P_2$ (фиг. 2.2a), или чрез повърхнините S_2 и S_4 , които се дефинират чрез триъгълниците $P_2P_3P_1$ and $P_4P_1P_3$ (фиг. 2.2b).

Ще определим $\cos \gamma_k$ за всяка от равнините S_k , $k=1,2,3,4$.

Равнината S_1 , е определена от точките

$P_1(x_i, y_i, z_{i,j})$, $P_2(x_{i+1}, y_i, z_{i+1,j})$, $P_4(x_i, y_{j+1}, z_{i,j+1})$, и израза $z = a_1x + b_1y$,

където:

$$a_1 = \frac{\partial z}{\partial x} (M_1) = \frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x}, \quad (2.9)$$

$$b_1 = \frac{\partial z}{\partial y} (M_1) = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta y}. \quad (2.10)$$

Ъгълът на наклон γ_1 за равнината S_1 подобно на израза (2.7) се определя с:

$$\cos \gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 1}} \quad (2.11)$$

Подобно, намираме ъглите на наклон γ_k на равнините S_k , $k=2,3,4$ представени с техните косинуси:

$$\cos \gamma_2 = \frac{1}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + 1}} \quad (2.12)$$

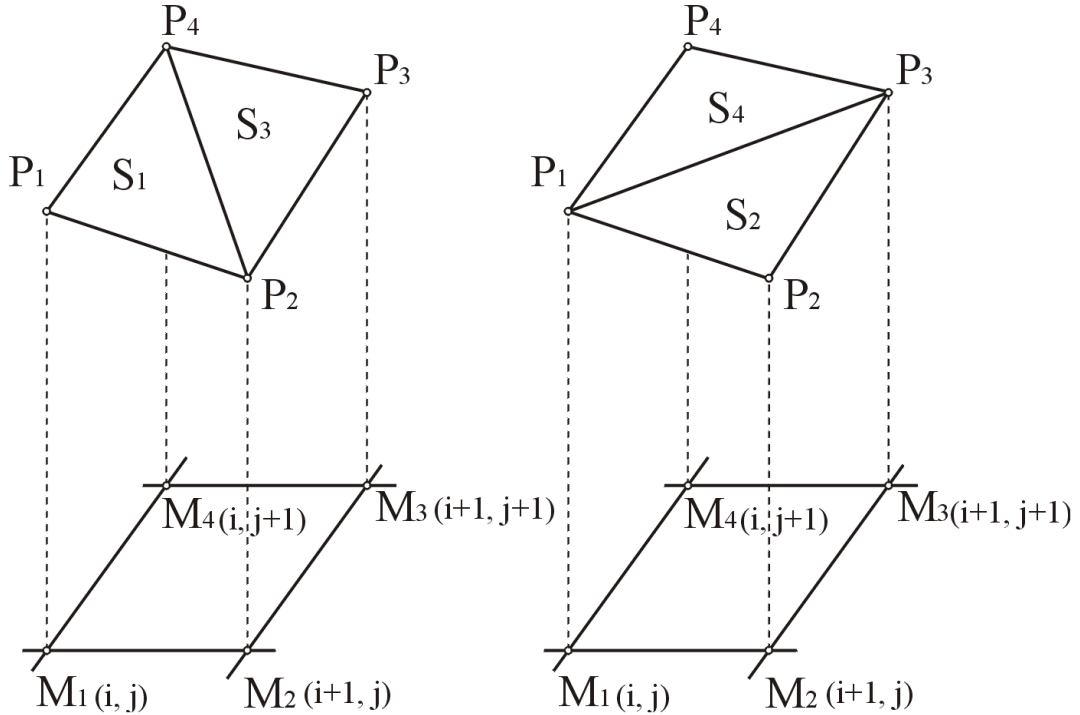
$$\cos \gamma_3 = \frac{1}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2 + 1}} \quad (2.13)$$

$$\cos \gamma_4 = \frac{1}{\sqrt{a_2^2 + b_1^2 + 1}} \quad (2.14)$$

където a_1, b_1 са определени по зависимостите (2.9), (2.10), и

$$a_2 = \frac{z_{i+1,j+1} - z_{i,j+1}}{\Delta x}, \quad (2.15)$$

$$b_2 = \frac{z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j}}{\Delta y}. \quad (2.16)$$



Фиг. 2.2. Триангулиране на клетка от матрицата на височините

След определянето на $\cos \gamma_k$, $k=1,2,3,4$ за очаквана величина на $\cos \gamma$ на клетката GRID (i, j) може да бъде взета стойността:

$$\cos \gamma = \min(\cos \gamma_1, \cos \gamma_2, \cos \gamma_3, \cos \gamma_4). \quad (2.17)$$

Наклонът на земната повърхнина за изследваната клетка от матрицата на височините в десетични градуси γ^{deg} се представя като:

$$\gamma^{\text{deg}} = \arccos(\min(\cos \gamma_k)) \frac{180}{\pi} \quad (2.18)$$

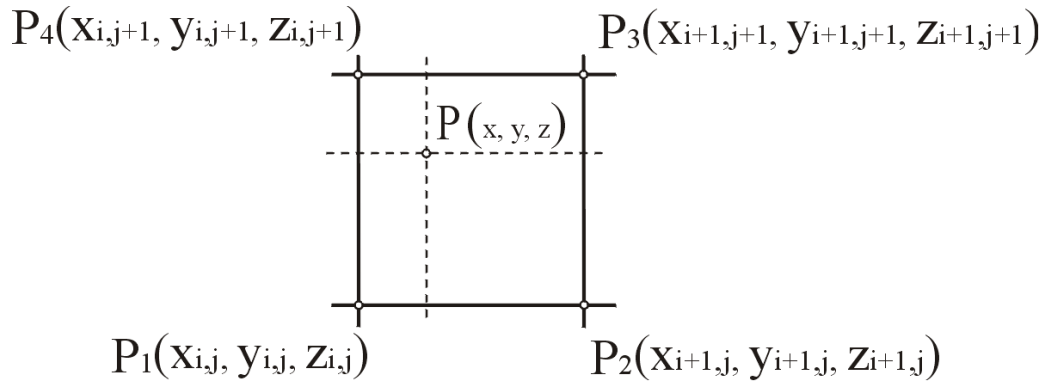
Означаваме матрицата на проходимост със символа A . С прилагане на изрази (2.8), или (2.18), за всяка клетка от $\{M\}$ имаме:

$$A \equiv \{\gamma_{i,j}^{\text{deg}}\}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.23)$$

Определяне на зона на видимост

За да е възможно да се определи зона на видимост, необходимо е да се познава височината на земната повърхнина във всички координати на моделираната околност. Вземайки предвид, че моделът на височината на земната повърхнина е представен чрез дискретни стойности на възлите от двумерна правоъгълна матрица $\{M\}$, и всяка

елементарна клетка е представена от четири точки с три-дименсионни координати (2.1), необходимо е да можем да познаваме височината z в произволна точка $P(x, y, z)$ с известни координати x и y в границите на областта $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, фиг. 2.4. Така предявеното изискване се постига с прилагане на математическата формулировка, известна като билинейна интерполация. [76, 86]



Фиг. 2.4. Определяне на височина с билинейна интерполация

С прилагане на нотацията по изразите (2.4), можем да дефинираме: $\Delta X = X_2 - X_1$, $\Delta Y = Y_2 - Y_1$.

Въвеждаме безразмерни коефициенти t , u както:

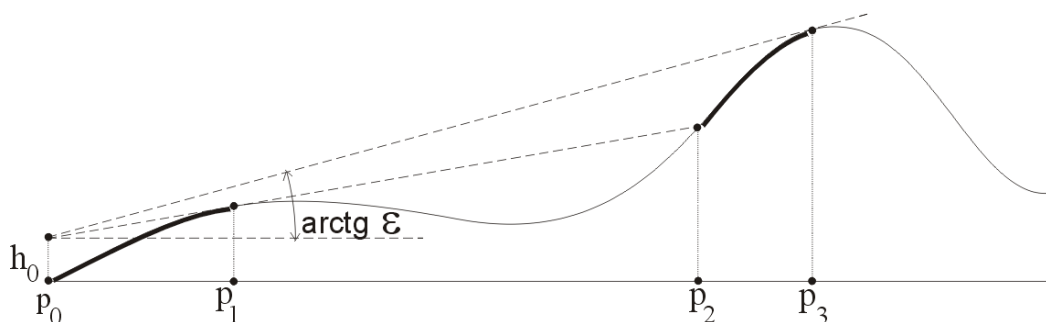
$$t \equiv \frac{x - X_1}{\Delta X}, \quad (2.24)$$

$$u \equiv \frac{y - Y_1}{\Delta Y}. \quad (2.25)$$

С прилагане на така дефинираните безразмерни коефициенти t , u , търсената височина z се определя чрез билинейна интерполация като:

$$z = (1-t)(1-u)Z_1 + t(1-u)Z_2 + tuZ_3 + (1-t)Z_4. \quad (2.26)$$

С прилагане на израза (2.26) е възможно да се определи серия от три-дименсионни точки в едно направление, наречени профил на релефа $\{p\}$. Използвайки профила на релефа [3], пристъпваме към определяне на линията на видимост в даденото направление.



Фиг. 2.5. Определяне на линия на видимост

Фигура 2.5 схематично показва процедурата за определяне на видимост за цели, разположени на земната повърхнина. Нека точката p_0 е позицията на наблюдателя, на височина h_0 над земната повърхнина. Наблюдателят от точка p_0 има отворена линия на видимост между

точките (p_0, p_1) , както и между точките (p_2, p_3) . Между точките (p_1, p_2) има затворена линия на видимост.

За конкретно определяне на линията на видимост, въвеждаме величината ъгъл на закритие между наблюдателя и точките от профила на земната повърхнина. Нека ъгълът на закритие е представен със своя тангенс и е означен с ε .

Нека с p_k е означена текуща точка-цел на земната повърхнина. Контролен ъгъл на закритие $\varepsilon_{\text{contr}}^k$ по отношение на текуща точка p_k от профила наричаме максималният ъгъл на закритие между наблюдателя p_0 и целта p_k . Изразява се като:

$$\varepsilon_{\text{contr}}^k = \max(\varepsilon_i), 0 < i \leq k. \quad (2.27)$$

Линията на видимост между наблюдателя p_0 и целта p_k е отворена, когато:

$$\varepsilon_k \geq \varepsilon_{\text{contr}}^k \quad (2.28)$$

Линията на видимост между наблюдателя p_0 и целта p_k е затворена, когато:

$$\varepsilon_k < \varepsilon_{\text{contr}}^k \quad (2.29)$$

С прилагане на зависимостите (2.28), (2.29) за всички възможни линии на видимост в кръгов сектор с център OP и радиус MOR се определя матрица на видимост, означена с B , където:

$$B \equiv \begin{cases} 1, & \varepsilon_k \geq \varepsilon_{\text{contr}}^k \\ 0, & \varepsilon_k < \varepsilon_{\text{contr}}^k \end{cases} \quad (2.30)$$

Модел за обработка на информацията при определяне на маршрута

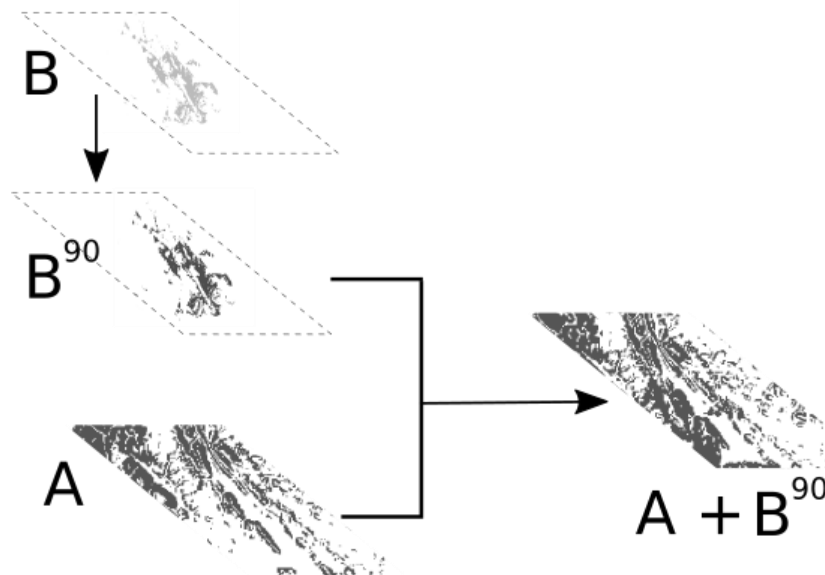
Така дефинираните матрица на видимост B и матрица на проходимост A се включени в информационната обработка за получаване на матрица на скрито придвижване.

На фиг. 2.6 а) в графичен вид е показан предложения модел за обработка на информацията. Съгласно представения математически апарат, матрица A съдържа стойностите на наклона на земната повърхнина, в десетични градуси, дискретизирани към клетките на ползвания цифров модел на местността.

Матрица B е определена по зависимост (2.30), представлява условията на видимост, и се състои от дискретни стойности $\{0,1\}$.

Матрицата, означена на фигурата с B^{90} е произведена от матрицата на видимост, като нейните елементи са умножени по определена числова стойност, отговаряща на непоходим за автономната платформа наклон.

Матрицата за маршрутизация при скрито придвижване е произведена с прилагане на поелементно събиране на матрицата на проходимост с модифицираната матрица на видимост.



Фиг. 2.6 а) Модел за обработка на информацията при скрито придвижване

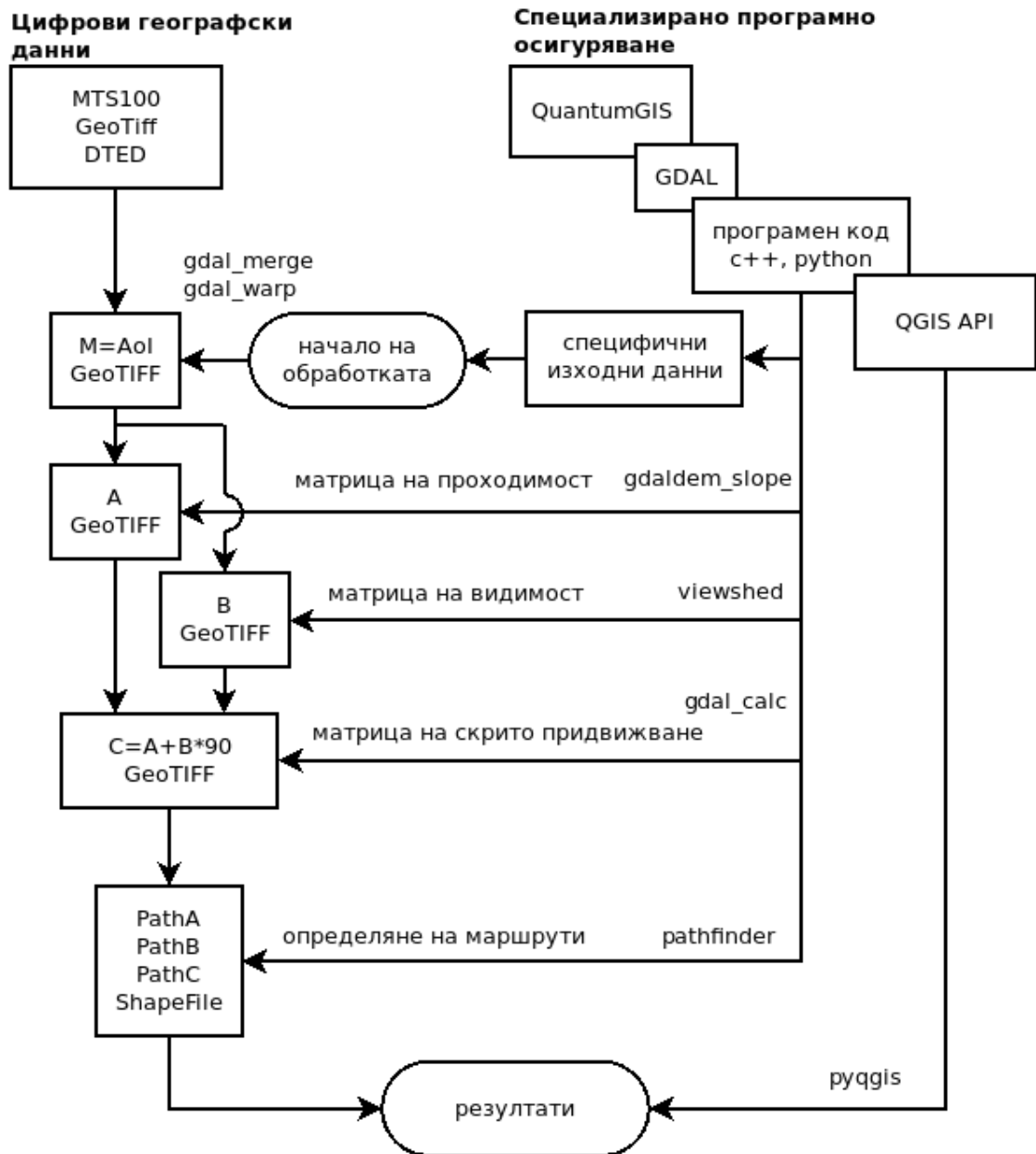
На фиг. 2.6 b) е показана алгоритмична последователност на обработка на изходните данни за маршрутизиране на автономна платформа със скрито по отношение на известен наблюдателен пункт придвижване – Secure Path Planning. Алгоритмичната последователност е разработена и предложена на научна конференция DIGILIENCE 21 и е публикувана в издание на „Information&Security: An International Journal“ [90].

Данните, необходими за по-нататъшна обработка, се съдържат в използвания цифров модел на местността, показан на фигурата като MTS100. Моделът включва електронни картографски данни под формата на растерни файлове от тип GeoTIFF и данни за височината на земната повърхност DTED (Digital Terrain Elevation Data) под формата на ASCII Grid. Първоначалните настройки, необходими за постигане на определено решение се подават от специално разработен за целта потребителски интерфейс.

Софтуерното решение е функционално разширение (plugin) – към специализирания продукт Quantum GIS [87] и използване на езици за програмиране Python и C++. Стандартната географска обработка на данни се извършва с модулите от софтуерната библиотека GDAL (Geographic Data Abstraction Layer) [43], която е продукт на международната организация OSGeo (Open Source Geospatial Foundation).[85]

Последователността на обработка е следната:

- Избор на област на интерес – AoI, определена от първоначалните данни и представянето им в подходяща за обработка цифрова форма – матрица на височините M във файлов формат GeoTIFF. Обработката се извършва чрез прилагане на модулите gdal_merge.py и gdal_warp.py от библиотеката GDAL;



Фиг. 2.6 b) Алгоритъм за марирутизация със скрито придвижване

- Определяне на матрица за проходимост А чрез прилагане на модула `gdaldem-slope.py`;
- Определяне на матрица за видимост В чрез прилагане на кода на C++ `viewshed.c`;
- Определяне на матрица на скрито придвижване С, за тази цел математическата обработка на данните от матрица А и матрица В се извършва с прилагане на модула `gdal_calc.py`.
- Изпълнение на алгоритъм за планиране на пътя от `pathfinder.py`, маршрутите - резултати се съхраняват под формата на векторни графични файлове от тип ShapeFile.
- Визуализация на резултатите – векторните слоеве PathA, PathB и PathC от тип „линия“ са определените маршрути, като се взема предвид матрицата за проходимост А, като се взема предвид матрицата

за видимост В, и като се вземе предвид комплексното (проходимост и видимост) планиране на пътя, матрица С.



Фиг. 2.10. Графичен комплексен резултат на маршрутизация при определен наклон за преодоляване и скрито от известен наблюдател

Приложена е основна форма на алгоритъм за планиране на пътя с ползване на растерни данни, известен в специализирани източници като Deterministic Eight (D8).[34, 110]

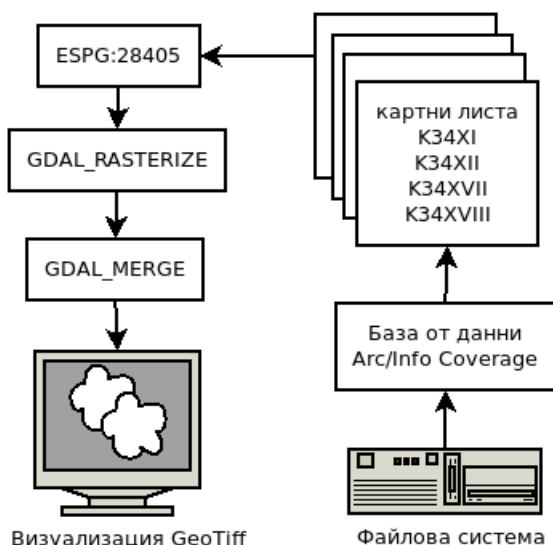
Графичните резултати за маршрутизация според зададената стойност MaxSlopeAngle на автономната платформа, и според условията на видимост спрямо определената позиция на противников наблюдател, е комбинирания вариант на проходимост. Този комплексен вариант на маршрутизация, като се избягват видимите от страна на противника зони, е показан на фиг. 2.10.

Таблица 2.1 представя по-важните числови резултати от проведените софтуерни експерименти.

Таблица 2.1. Числени резултати от експеримента за маршрутизация.

Показатели	Според наклона	Според видимостта	Комплексно
Време за обработка	0.068 s	0.042 s	0.107 s
Очаквана дължина на маршрута	34439.3 m	38475.7m	38818.3 m

Преодоляване на картографирани препятствия от вид растителна покривка, с прилагане на цифрови данни за растителната покривка. Ползва се гео база от данни, продукт на Военно-географската служба на Българската армия.



Фиг. 2.11. Подготовка на данни при определяне на проходимост

За определяне на проходимост в различни условия, включително и с военно предназначение, е приложим алгоритъм D8 [30, 36]. Важна особеност при прилагане на алгоритъма D8 е необходимостта входните данни да са представени в растрен вид.

Преодоляване на некартографирани препятствия, ползва се стереокамера и са приложени методи на компютърно зрение (Computer Vision) [33, 53].

Процедура за калибриране на стереокамера

Математически изкривяването може да се представи с изрази:

$$P = K \times [R|T], \quad (2.31)$$

където с K е означена т.н. вътрешна матрица (intrinsic matrix) на камерата, а $[R|T]$ представя т.н. комбинирана външна матрица (extrinsic matrix) и R отговаря за радиалното изкривяване, а T отговаря за тангенциалното изкривяване.

Вътрешната матрица K се състои от специфични за камерата параметри. Тя включва информация като фокусно разстояние (f_x, f_y) , оптични центрове (c_x, c_y) , нарича се още матрица на камерата. Матрицата K зависи само от вида на камерата, така че след като се веднъж се определи, може да се запази за бъдещите изчисления. Изразява се като:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

Радиалното изкривяване R се решава по следния начин:

$$x_{corrected}^R = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6), \quad (2.33)$$

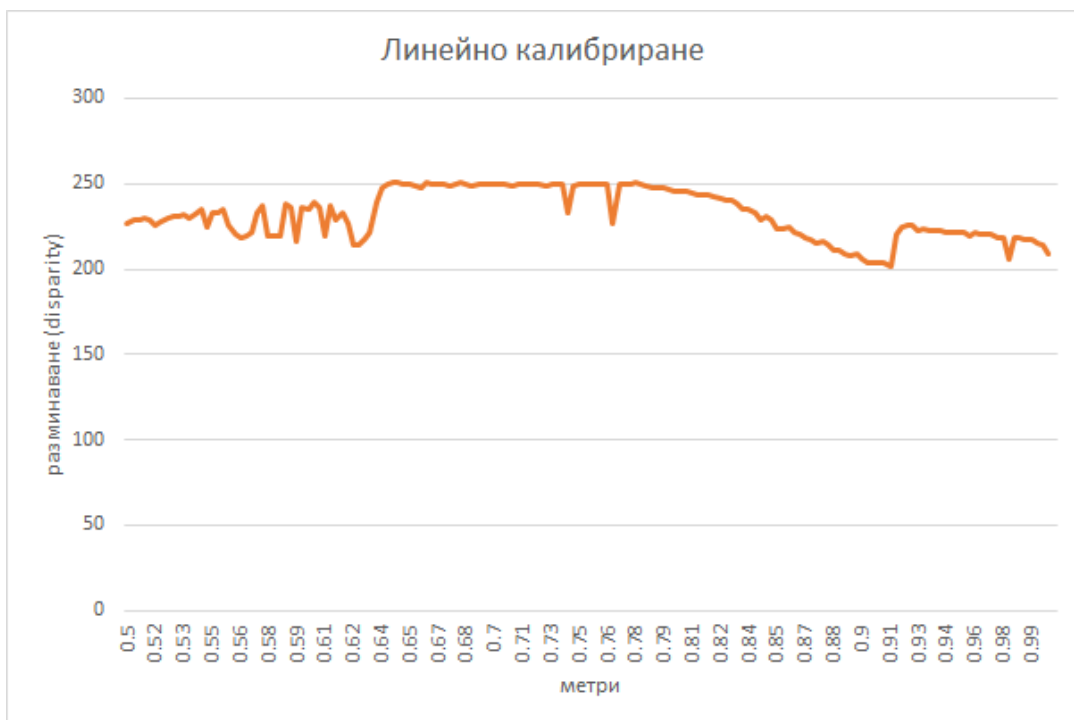
$$y_{corrected}^R = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6), \quad (2.34)$$

Тангенциалното изкривяване T възниква, тъй като лещата за снимане на изображение не е подравнена идеално успоредно на равнината на изображението. Така че някои области на изображението може да изглеждат по-близо от очакваното. Решава се с прилагане на изразите:

$$x_{corrected}^T = x + (2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)), \quad (2.35)$$

$$y_{corrected}^T = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy). \quad (2.36)$$

Следователно, трябва да намерим пет параметъра (k_1 k_2 p_1 p_2 k_3), известни като коефициенти на изкривяване, което е извършено с прилагане на процедури от OpenCV. Точните стойности на експериментално определените коефициенти са представени в Приложение № 2.1.



Фиг. 2.19. Първични данни от линейното калибриране

Позоваване на математическите зависимости (2.28 ... 2.39 в дисертационния труд) дава основание за определяне на стойности Disparity в синхронното стереоизображение, и от там определяне на стойности Depth Map [25].

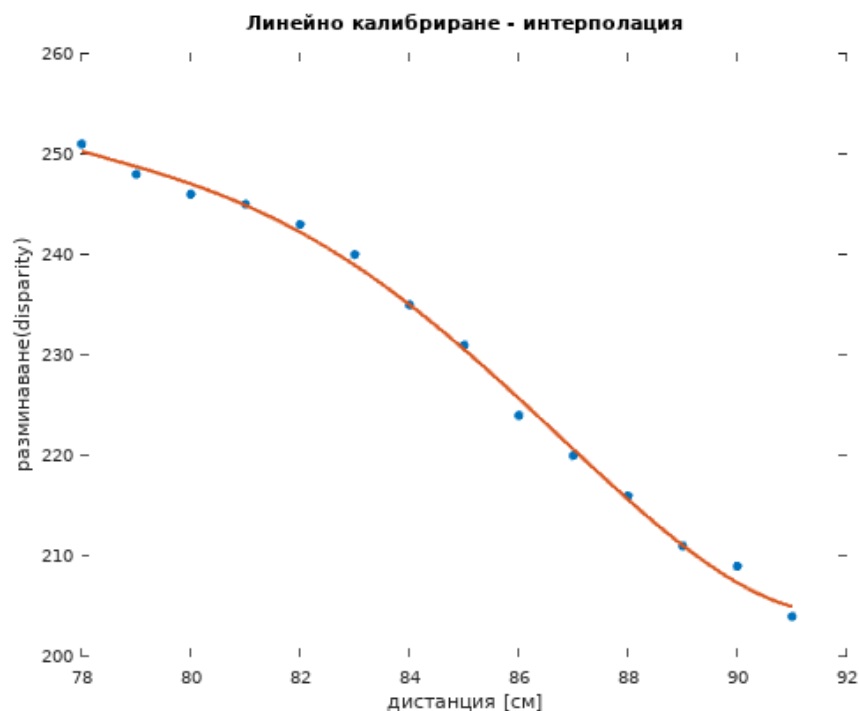
С цел постигане на практически резултат е проведено линейно калибриране на ползваната стереокамера.

Точните числови стойности на получените от измерването данни са представени в Приложение № 2.2. За разстояния до преградата между 0.5 m и 1 m в графичен вид данните са представени на фиг. 2.19.

Анализът на графично представените експериментални данни показва, че в диапазона от 0.75 m до 0.91 m характерът на графиката качествено отговаря на теоретично очакваната зависимост според изрази (2.38, 2.39). Приложен е математически интерполяционен метод за определяне на аналитична форма на зависимостта между разстоянието до препятствието и пикселно разминаване в изображението. С прилагане на програмния продукт за математическа обработка при научни изследвания GNU Octave [46], с помощта на метода `polyfit` са определени коефициентите на интерполяционен полигон от четвърта степен. Коефициентите на интерполяционния полигон са представени на Табл. 2.4. Фигура 2.20 е графична визуализация на интерполяционната зависимост.

Таблица 2.4. Коефициенти на интерполяционен полином

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
2.9180e-03	-9.6307e-01	1.1888e+02	-6.5077e+03	1.3361e+05

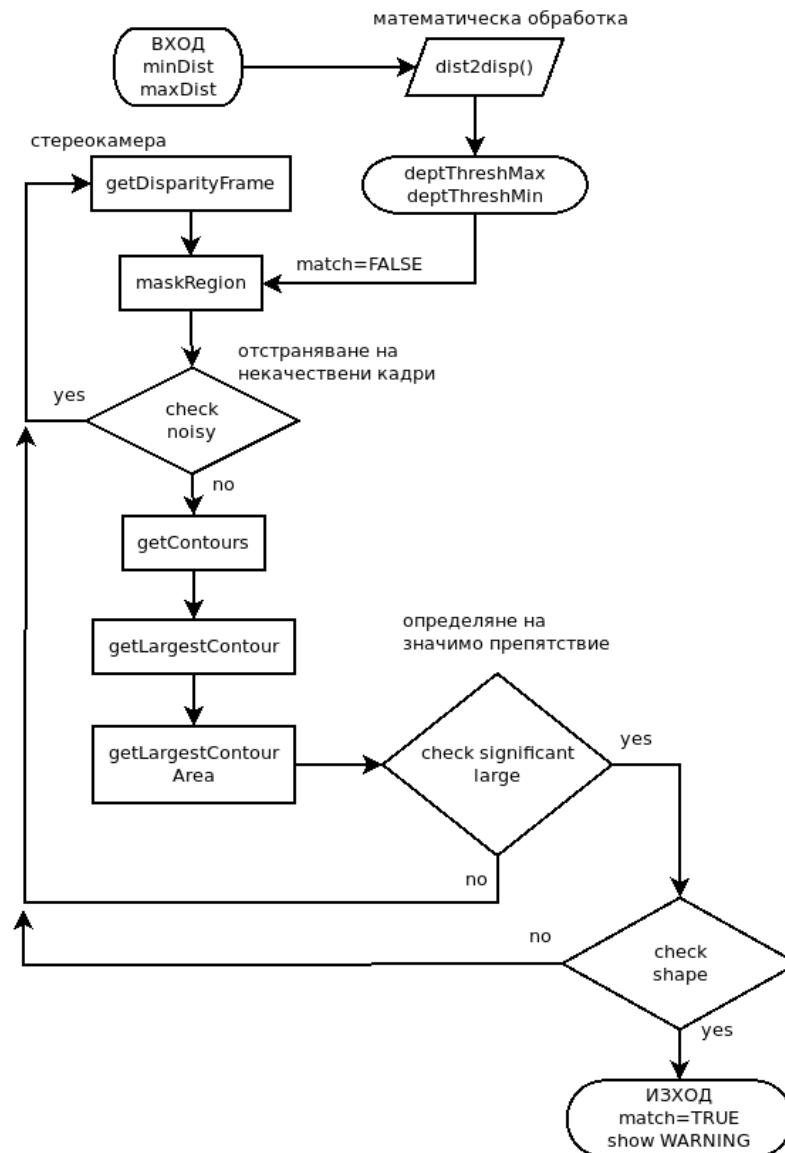


Фиг. 2.20. Интерполяционна зависимост

Аналитичният вид на интерполяционната зависимост е следния:

$$dsp = a_4 + a_3y + a_2y^2 + a_1y^3 + a_0y^4, \quad (2.40)$$

Така получената интерполационна зависимост (2.40) между разстоянието до препятствието и пикселното разминаване в изображението Disparity дава възможност да бъде алгоритмизирано откриването на не картографирано препятствие при движение на автономната бойна платформа по определен маршрут. На фиг. 2.21 графично е представен алгоритъм за откриване на не картографирани препятствия.



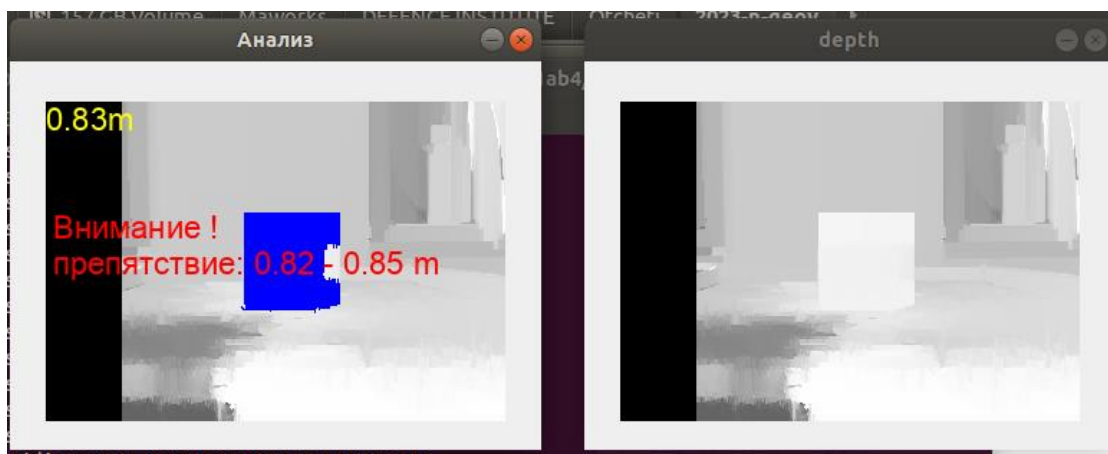
Фиг.2.21. Алгоритъм за откриване на препятствия

Алгоритъмът е апробиран с прилагане на програмен код на скриптовия програмен език Python, Приложение № 2.3. На Фиг. 2.22 е представен резултатът от изпълнението на гореописания алгоритъм с избрани входни данни $\text{minDist} = 0.82 \text{ m}$ и $\text{maxDist} = 0.85 \text{ m}$.

Изводи и резултати

Предложен е модел за обработка на информацията при планиране на пътя на автономна бойна платформа с изискване за скрито придвижване по отношение на известен противников наблюдателен

пункт и съобразно техническите възможности за преодоляване на определен наклон на склона в посоката на движение.



Фиг. 2.22. Анализ за некартографирано препятствие

Определен е подходящ математически апарат за представяне на наклона на земната повърхнина и за дефиниране на зони на видимост.

Конфигурирано е работно място с инсталиран специализиран софтуер QuantumGIS. Предложените алгоритми са апробирани със създадено функционално разширение (plugin) към QuantumGIS с приложение на езиците за програмиране Python и C++.

Разгледани са математическите основи за локализация на некартографирани близки препятствия с прилагане на методите на компютърното зрение посредством използването на стерео камера. Представени са известни процедури за подготовка на стерео камера и е проведена съответната експериментална работа с наличната, и специално създадена в Институт по отбрана лабораторна екипировка.

ГЛАВА 3: Методи и алгоритми за контрол на движението на автономна бойна платформа

Математически модел на вектора на състоянието на автономната платформа

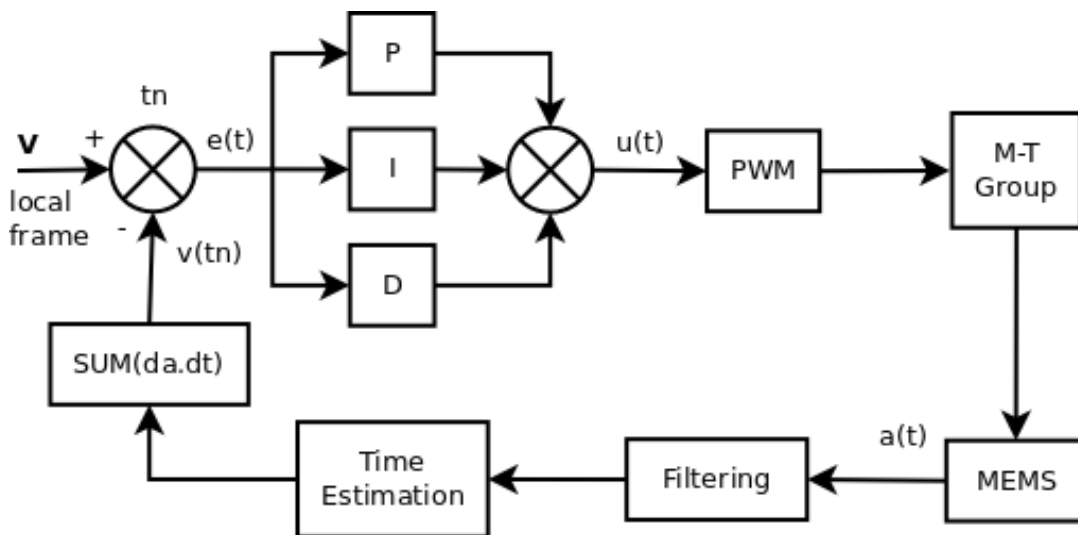
Приемаме, че автономната платформа следва предварително определена траектория, която е дефинирана в глобална равнинна система (X_e, Y_e) . Предполагаме, че автономната платформа се движи с линейна скорост $v = (v_x, v_y, 0)$ и се завърта с ъглова скорост $\omega = (0, 0, \omega_z)$, изразена в локална система (X, Y) с масов център (COM).

Линейната скорост v и ъгловата скорост ω са определени в локалната система (X, Y) . Векторът на състоянието $q = (x, y, \theta)$ се представя с действителните координати (x, y) на автономната платформа в глобалната система, а θ описва ориентацията на локалната система спрямо глобалната координатна система.

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^t \dot{x} dt \\ \int_0^t \dot{y} dt \\ \int_0^t \dot{\theta} dt \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Както се вижда от изразите (3.5 ... 3.9), векторът на състоянието q на движеща се в равнина автономната платформа е напълно дефиниран с известна линейна скорост v в локалната система и ъглова скорост ω на въртене на локалната система спрямо глобалната координатна система.

Модел за контрол на скоростта на движение с прилагане на обратна връзка по затворен контур



Фиг. 3.2. Обратна връзка с PID регулиране

За известен период от време бордовата апаратура на автономната платформа трябва да осигурява движение с избраната, или близка до нея скорост. Фигура 3.2 схематично представя регулираща скоростта на придвижване система с обратна връзка, с използване на най-често прилагания принцип на PID (Proportional Integral Derivative) регулиране [21, 71, 105]. За пример разглеждаме движението само по една ос.

В показаната схема входен контролен сигнал се явява желаната скорост V , която трябва да бъде поддържана от автономната платформа. Със символа $v(tn)$ е означена текуща скорост на автономната платформа. Разликата между желаната и текущата скорост (наричана още грешка) е означена с $e(t) = V - v(tn)$. Както е описано в цитираните по-горе в текста литературни източници, управляващият механизъм, обозначен с P, I и D, изобразява

пропорционалните, интегралните и диференциалните стойности за компенсацията на грешката. Интерпретацията на тези стойности е, че P изразява настояща грешка, I показва натрупване на минали грешки, а D е прогнозиране на бъдещи грешки. Математически израз на процеса на регулиране на регулатора може да се покаже като:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.10)$$

където:

$u(t)$ е стойността на управляващото действие;

K_p , K_i и K_d са съответно пропорционалната, интегралната, и диференциалната съставка на управляващото действие;

t е моментното време.

Ако имаме масив $\{a_n\}$, $n = 1, 2, \dots, N$ от измерени стойности на ускорение, текущата скорост $v(t_n)$ в моментното време t_n може да бъде определена с изрази:

$$v(t_n) = v(t_{n-1}) + \frac{a_n - a_{n-1}}{2} (t_n - t_{n-1}), \quad (3.11)$$

с допускането, че $v(t_0) = 0$ и $a_0 = 0$.

Както е представено на фиг. 3.2, прилагането на изрази (3.11) е възможно да даде необходимата точност, когато интервал от време на цикъла на управление ($t_n - t_{n-1}$) е възможно най-малък и стойностите на ускорението $\{a_n\}$ са измерени с минимални грешки.

Предпоставки за подобряване на процеса на контрол на скоростта на движение

За целите на настоящето изследване са ползвани високо конфигурируеми Inertial Measurement Unit (IMU) компоненти с възможност за цифров изход от тип MPU9250/6050.

Както е посочено в публикация [75], при използването на този IMU са възможни типични измервателни грешки. Тези грешки могат да бъдат системни и случайни грешки. Основните видове систематични грешки са грешки при статично отклонение, грешки на мащабните фактори и грешки при монтажа. Систематичните грешки са предвидими и в повечето случаи производителят предоставя хардуерно предварително заредени стойности за компенсация.

Таблица 3.1. Цифров нискочестотен филтър (DLPF)

Режим на DLPF	0(off)	1	2	3	4	5	6	7
Честота [Hz]	1.13	420	184	92	41	20	10	5
Закъснение [ms]	0.75	1.94	5.80	7.80	11.80	19.80	35.70	66.96

При измервания с IMU възникването на случайни грешки е с предварително неопределимо, обсъждано в [31, 32] и се представят като част от системния шум. Неизбежна съставка на шума, според

авторите, са естествените вибрации на механичната конструкция на автономната платформа. Тези естествени вибрации зависят от много различни фактори и по принцип са трудно предвидими.

Внедряването на техники за намаляване на шума се използва широко в базирани на IMU приложения за навигация и ориентация. Производителите на IMU предлагат като опция конфигурируем хардуерен вграден цифров нискочестотен филтър (Digital Low Pass Filter - DLPF). Точните стойности за DLPF характеристиките на MPU9250 [79] са представени в таблица 3.1.

Нека масивът от възможни срязващи честоти при активиран DLPF на IMU е обозначен като $P = \{P_1.. P_n\}$, където $n = 1,2,...,7$.

Правилният избор на срязваща честота за нискочестотно филтриране е възможен, като се вземат предвид характерните честоти на сензорния шум, породени от присъщите вибрации при движение на автономната платформа. Ако е определен масивът от характерни за платформата честоти $H = \{H_1..H_n\}$, където $n = 1,2,...,N$, тогава търсената стойност на срязващата честота O_c може да се определи като:

$$O_c = \max(P | H) . \quad (3.12)$$

За определяне на характерните честоти H при движение на автономната платформа, в това изследване се предлага софтуерна реализация на трансформация на Фурие върху данни от акселерометъра на идентичен втори MEMS сензор, монтиран на същата платформа.

Подобно на представеното в литературните източници [19, 73, 98], трябва входният сигнал $x(k)$ (стойности на амплитудата в последователни моменти от времето, получени от сензора) да бъде представен като $H(n)$ – стойности на амплитудата за дискретна последователност от честоти. Преобразуването се представя с математическия израз:

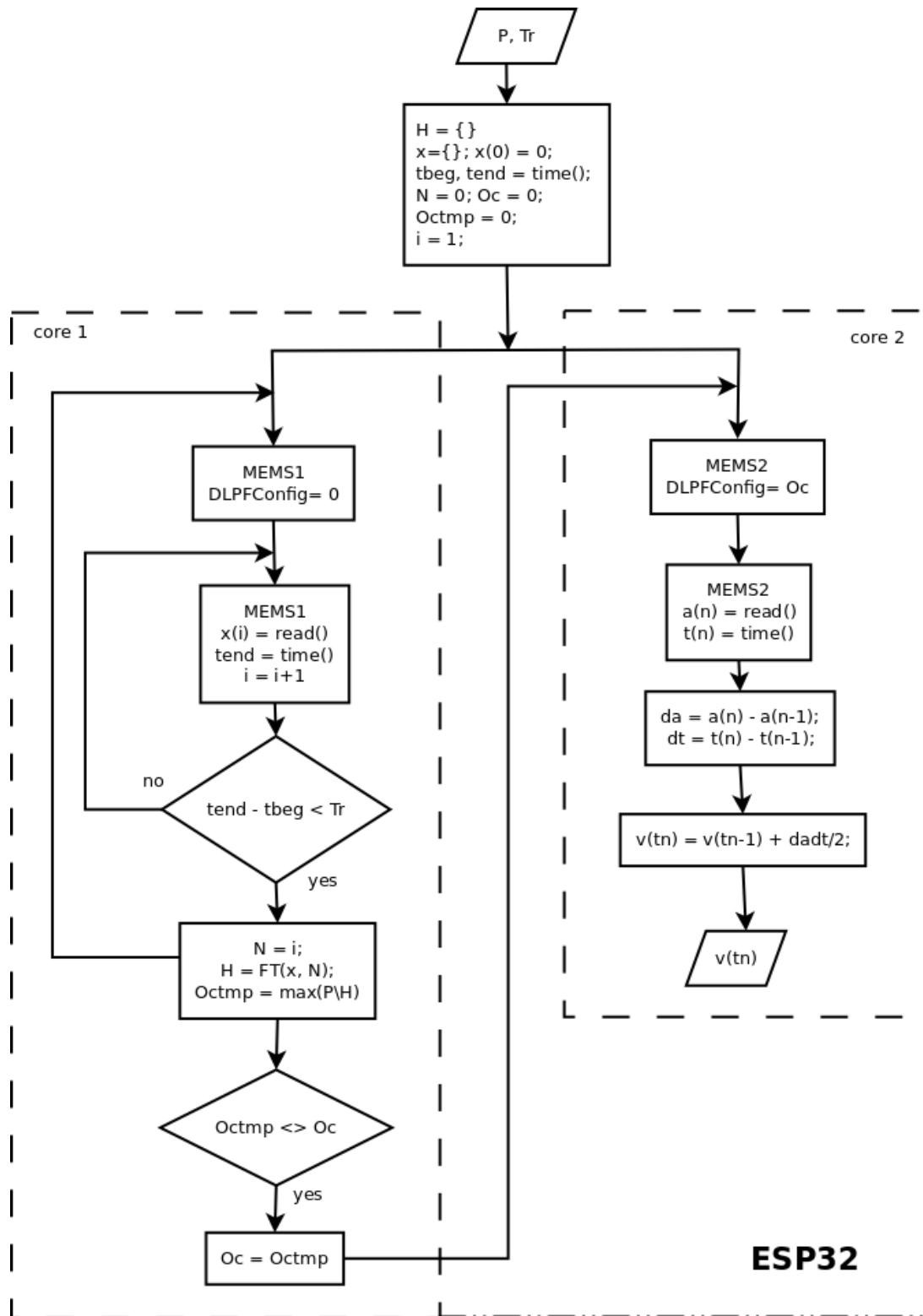
$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{\frac{2\pi jkn}{N}} \quad (3.13)$$

или еквивалентно с прилагане на формула на Ойлер:

$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \left(\cos \frac{2\pi kn}{N} - j \sin \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (3.14)$$

където $H(n)$ е търсеното множество стойности на характерни честоти при движение на автономната платформа, N е броят определени честоти и $n = 0,1,..., N-1$.

Софтуерен подход с адаптивен цифров филтър за контрол на скоростта на движение



Фиг. 3.4. Поток от данни при адаптивно филтриране

На фиг. 3.4 схематично е представен потокът от данни и последователността на цифрова обработка за подобро адаптивно филтриране на потока от първични данни от акселерометъра на сензори от тип MEMS с представител MPU9250. Последователността за

цифрова обработка е разработена и предложена на научна конференция CompSysTech'20 и публикувана в издание на „Association for Computing Machinery“ [19]. За основен изчислителен модул е ползван двудрен микроконтролер ESP32.

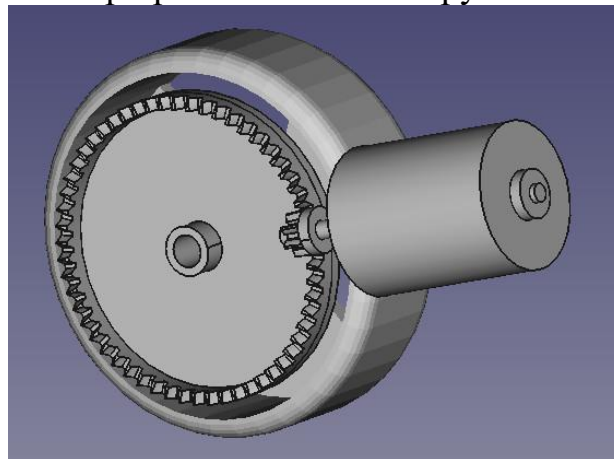
Ядрото „core 1“ е предназначено за добиване на първични сензорни данни от акселерометъра на MEMS 1 и извършване на честотен анализ на Фурие. Работи при изключен DLPF с възможно най-висока честота на опресняване на данните. С прилагане на зависимост (3.12) се определя актуалната за измервания период от време честота на срязване O_c .

Ядрото „core 2“ осигурява изчислителните процедури в подсистемата регулатора на скоростта. С прилагане на числено интегриране на акселерометрични данни от MEMS2 определя скоростта $v(t_n)$. За подобро адаптивно намаляване на шума, сензорът MEMS 2 използва своя вграден DLPF, установен на определената от „core 1“ срязваща честота O_c .

Експериментално определяне на работни характеристики

Научно-практически интерес представлява определяне на типични смущаващи честоти при функциониране на наземна автономна платформа. За провеждане на практически експеримент е използван изграден физически модел на наземна автономна платформа.

Използваме предположението, че основни източници на вибрационни смущения е силовото задвижване на модела. Силовото задвижване на модела е осъществено с четири мотор-трансмисионни групи, всяка от които е с предавателно отношение 1:8. Тримерният модел на една от мотор-трансмисионните групи е показан на фиг. 3.9.

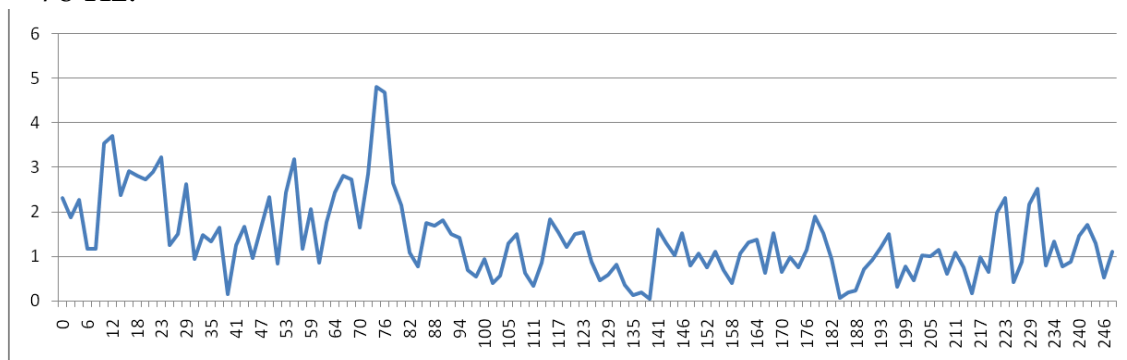


Фиг. 3.9. Тримерен модел на мотор-трансмисионна група

С прилагане на специализиран измервателен прибор – оптически тахометър тип DT-2234C (показан на Приложение № 3.2) – е извършено измерване на ротационната скорост на едно от задвижващите колела при подаване на 80% от максималната мощност към постояннотоковия електродвигател на това колело. С получени

показания от тахометъра в границите 543÷599 RPM определяме приблизителна честота на смущение от въртене на колелото ~ 9.5 Hz.

Вземайки предвид известното предавателно отношение на мотор-трансмисионната група, определяме приблизителната честота на смущение от работата на постоянно-токовия електродвигател от ~ 76 Hz.



Фиг. 3.10. Експериментално получена честотна диаграма при работа на модел на автономна платформа

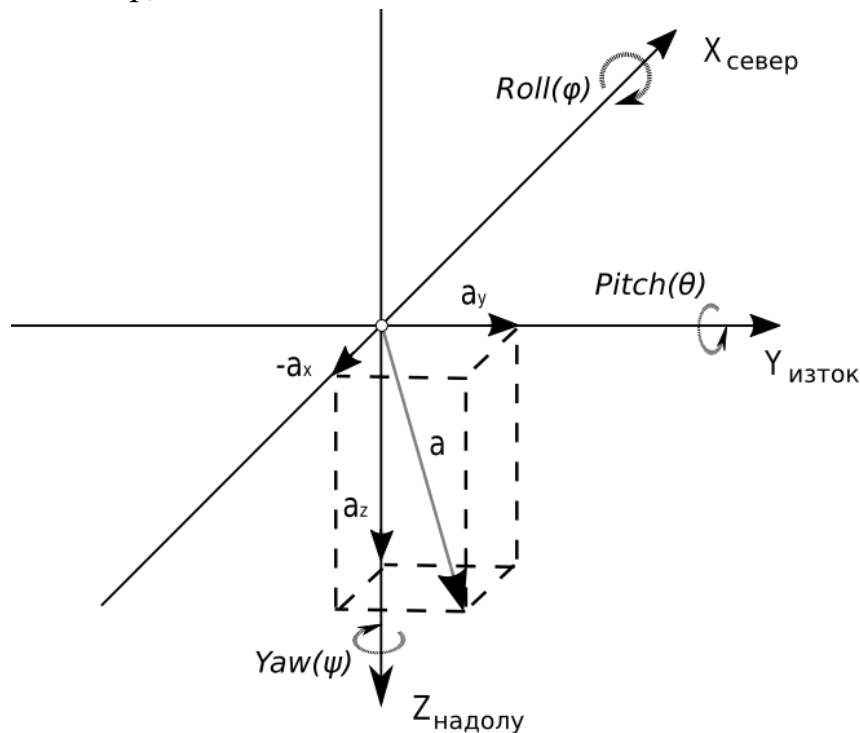
Получените с директно измерване очаквани стойности на честотите на вибрационни смущения при движение на наземната автономна платформа са използвани за апробиране на действието на предложения адаптивен цифров филтър в частта му извършване на честотен анализ на Фурие. Отделен модул от firmware на бордовия микроконтролер ESP32 е изпълнен с прилагане на софтуерната библиотека „arduinoFFT“ [42] и средата за разработка Arduino ver. 1.8.15. Изходният код, написан на езика за програмиране C++ е представен на Приложение № 3.3. Резултатът от извършения от бордовия микроконтролер честотен анализ е показан графично на фиг. 3.10. Потвърждение на очакваните резултати са забележимите пикове в амплитудата на сигнала в честотните области 6÷12 Hz и 70÷82 Hz, което добре кореспондира с директно измерените 9.5 Hz и 76 Hz.

За да бъде оценена грешката в линейното позициониране е избрана постановка на т.н. „статично“ измерване. Моделът на автономната наземна платформа е неподвижен със задействана сензорна и микроконтролерни подсистеми. Грешката в позиционирането е представена като изчислено виртуално преместване, което в идеалния случай би трябвало да е нула метра за произволно дълъг период от време. В условията на проведения експеримент резултатното преместване е 279.4 m за време от 25.8 min (1553 s).

Контрол на посоката на движение с прилагане на магнитометричен сензор

За постигане на достатъчен за практическо прилагане резултат, съвременните математически методи ползват три-димензионни данни за моментни стойности на ускорение (акселерометър), моментни стойности на скорост на ъглово завъртане (жироскоп) и моментни

стойности на напрегнатостта на земното магнитно поле (магнитометър).



Фиг. 3.13. Конвенция за определяне на ориентацията в пространството

Софтуерната реализация включва цифрово филтриране и итеративни алгоритми, прилагани върху сензорните данните, както и поредица от геометрични трансформации. Резултатът от работа на този изчислителен модул е достатъчно точно определяне на ориентацията на автономната платформа в пространството – азимут (Yaw), надлъжен (Pitch) и напречен (Roll) наклон. Конвенцията за прилагане на YPR, графично представена на фиг. 3.13 е в основата на навигационните системи на автономни апарати от различен тип. [60].

За определяне на ориентацията YPR са в сила зависимостите:

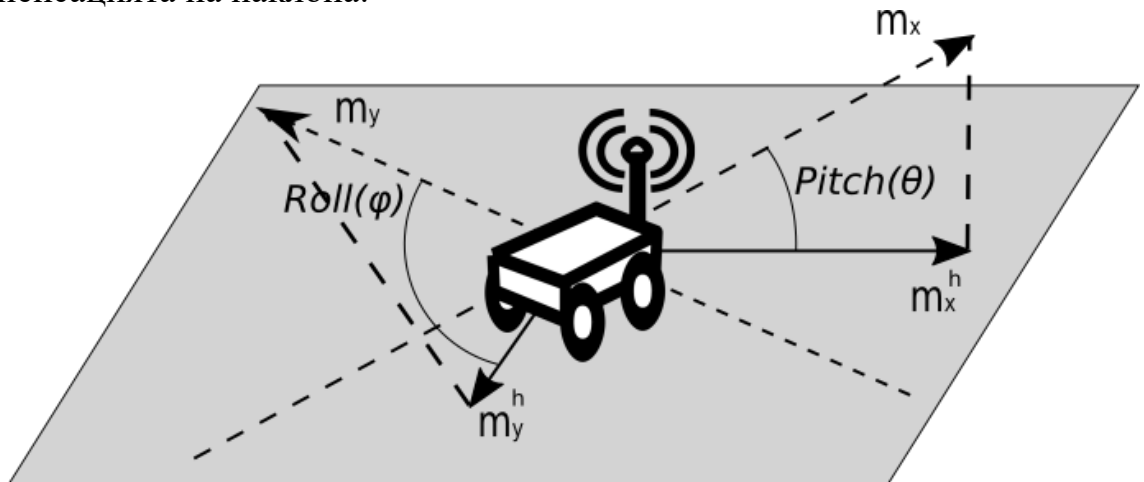
$$\begin{pmatrix} \theta \\ \varphi \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{(a_y^2 + a_z^2)}} \right) \\ \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right) \\ \tan^{-1} \left(\frac{m_y}{m_x} \right) \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

В случая, когато е известна началната ориентация в покой на автономната платформа θ_0 , φ_0 , ψ_0 , текущите стойности се могат да бъдат определени също така чрез показанията на жирокопа:

$$\begin{pmatrix} \theta_{n+1} \\ \varphi_{n+1} \\ \psi_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_n + \omega_x \Delta t \\ \varphi_n + \omega_y \Delta t \\ \psi_n + \omega_z \Delta t \end{pmatrix}, \quad (3.19)$$

където Δt е достатъчно малък интервал от време, често определян експериментално.

За максимално коректно определяне на азимута е необходимо да бъде отчетен текущия надлъжен и напречен наклон на автономната платформа, или да бъде извършена процедурата известна в специализираната литература като “tilt compensation” [72, 101]. На фиг. 3.14 графично е представено построението за определяне на компенсацията на наклона.



Фиг. 3.14. Определяне на компенсацията на наклона

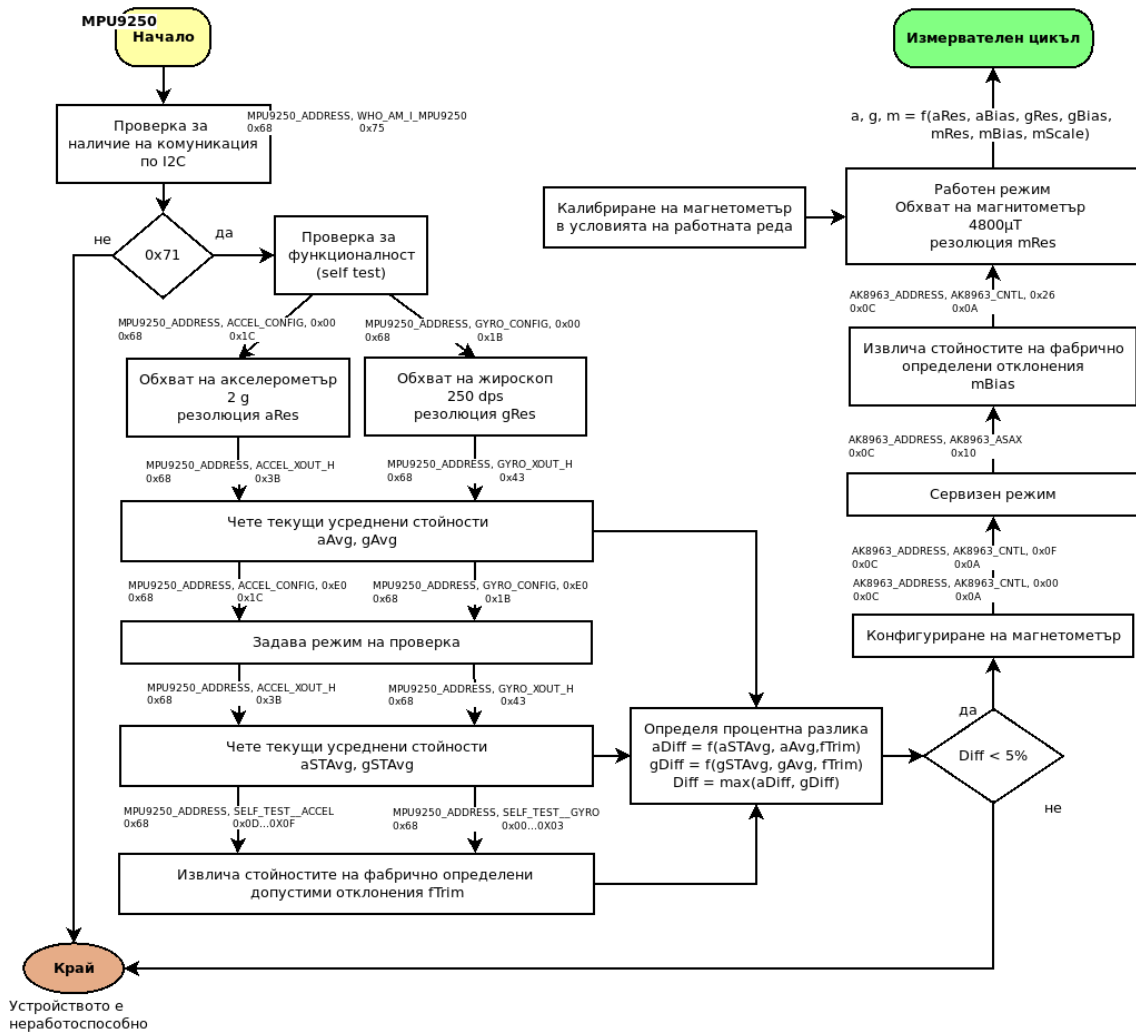
Тогава коефициентите m_x и m_y от израза (3.18) придобиват вида:

$$m_x^h = m_x \cos \theta + m_z \sin \theta, \quad (3.20)$$

$$m_y^h = m_x \sin(\varphi) \sin(\theta) + m_y \cos(\varphi) + m_z \sin(\varphi) \cos(\theta). \quad (3.21)$$

За да бъде уверен потребителя на сензорни данни в правилното функциониране на IMU, и получаваните данни да бъдат максимално близо до реалните, производителя на сензора препоръчва преди всяко пускане в работен режим да бъдат извършвани процедури за самодиагностика и определяне на очакваните отклонения при измерваните стойности.

На фиг. 3.16 във вид на диаграма са показани в своята последователност извършваните действия при включване на инерциален сензор от типа на MPU9250.



Фиг. 3.16. Самодиагностика и компенсация на фабрично установени отклонения при MPU9250

Метод за пространствена компенсация на отклоненията при магнитометричен сензор

За определяне на азимута ψ с прилагане на зависимостите (3.18) разглеждаме показанията m_x и m_y , пролучени при работа на магнитометричния сензор. В процеса на калибриране на магнитометъра е съхранен масив от данни с моментните стойности на магнитното поле, отчетени по всяка една от трите $\{x, y, z\}$ измервателни оси. Нека проведем геометричен анализ върху натрупаните данни.

Ако разгледаме данните като структура от тип pointcloud $\{mX_i, mY_i, mZ_i\}$, е възможно да се определи съответната апроксимираща равнина при завъртане на сензора около от z . Нека апроксимиращата равнина бъде представена с израза:

$$ax + by + d = z, \quad (3.31)$$

където търсените a и b са ъгловите коефициенти по съответните оси, търсеното d е разстоянието до началото на координатната система.

Коефициентите a , b , d на апроксимиращата равнина са представени като:

$$F = \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

Тогава е в сила очевидното равенство $A^* F = B$, или описано като процедура за разделяне на матрици [63, 80]:

$$F = (A^T * A)^{-1} * A^T * B. \quad (3.35)$$

Стойностите на търсените коефициенти от израза (3.31) са определени с прилагане на софтуерен код на езика за програмиране Python, Приложение № 3.4. Резултатите от числения анализ за определяне на апроксимиращи равнини на магнитометричните данни при въртене около осите z , y и x се виждат в таблица 3.5.

Таблица 3.5. Коефициенти на апроксимираща равнина

Ос на въртене	a	b	d
z	-0.001729	-0.042330	52.239663
y	6.648565	-0.611659	202.464604
x	-0.099913	-9.486075	-290.099274

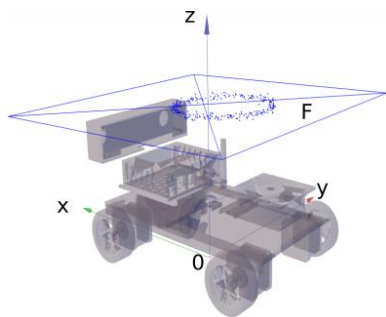
Експериментално получените числени резултати позволяват да се извърши тримерна визуализация на свалените магнитометрични данни и съответните апроксимиращи равнини. На фиг. 3.17 е представен общия вид на структурата pointcloud при въртене около ос z , на фиг. 3.18 и 3.19 са представени ъгловите отклонения в поглед xz и yz .

След така извършените допълнителни изследвания, компенсиранието спрямо наклона показания на магнитометъра m_x^h и m_y^h от изразите (3.20, 3.21) придобиват вида:

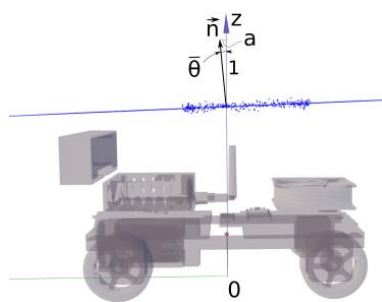
$$m_x^h = m_x \cos(\theta + \bar{\theta}) + m_z \sin(\theta + \bar{\theta}), \quad (3.36)$$

$$m_y^h = m_x \sin(\varphi + \bar{\varphi}) \sin(\theta + \bar{\theta}) + m_y \cos(\varphi + \bar{\varphi}) + m_z \sin(\varphi + \bar{\varphi}) \cos(\theta + \bar{\theta}), \quad (3.37)$$

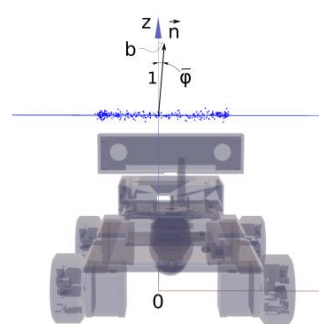
където $\bar{\theta} = \tan^{-1}(a)$ и $\bar{\varphi} = \tan^{-1}(b)$,
коефициентите a и b са определени по зависимост (3.35).



Фиг. 3.17



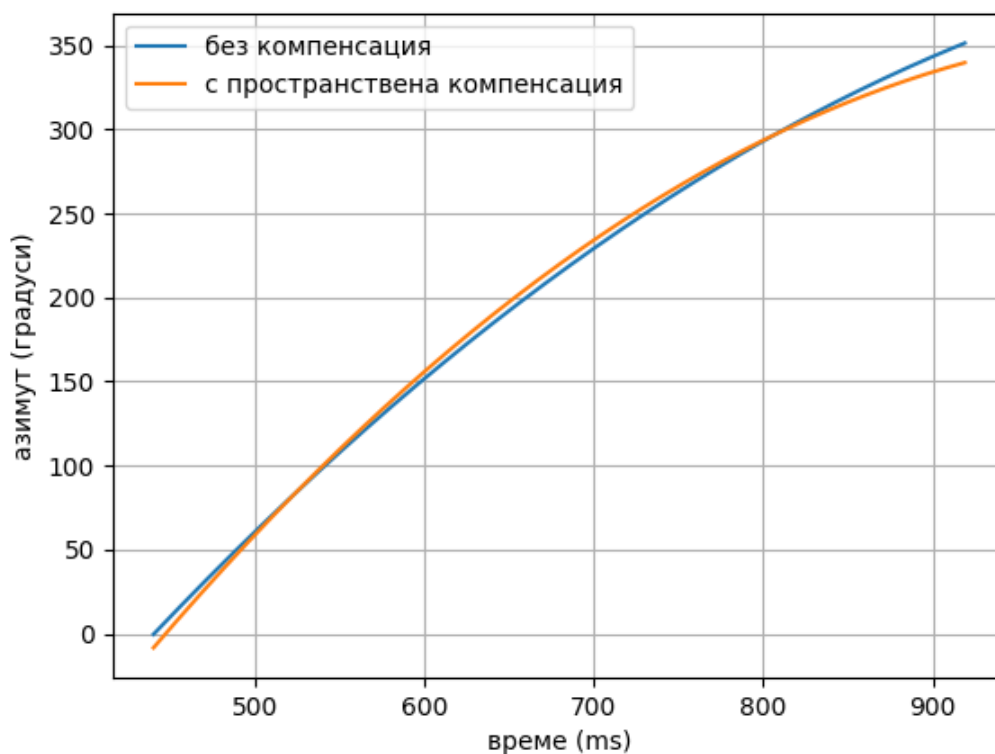
Фиг. 3.18



Фиг. 3.19

Резултати от апробацията на метода за пространствена компенсация

Приведените зависимости (3.37) и получените числени данни за коефициенти на геометрични отклонения (табл. 3.5) дават основата за провеждане на апробационен експеримент. Целта на експеримента е да оцени прилагането на предложениия метод за пространствена компенсация как влияе на прецизността при определяне на азимута на движение на експерименталната автономна платформа.



Фиг. 3.20. *Пространствена компенсация на отклоненията при показания на магнитометричен сензор*

На фиг. 3.20 с различен цвят графично е показано как се променя определения азимут на автономната платформа при извършване на един пълен оборот около вертикалната си ос. Кривата „без компенсация“ е визуализация на получените магнитометрични данни с прилагане на зависимости (3.20, 3.21), кривата „с пространствена компенсация“ е получена с прилагане на зависимостите (3.36, 3.37). Числена стойност на визуално открояващите се разлики между двете

криви е получена по известния статистически метод „средно квадратично отклонение“.

Изводи и резултати

Извършено изследване на проблемни моменти при извършване на процедурите по контрол на движението на наземна автономна платформа. Представени са математическите основи за определяне на компонентите на вектора на състоянието. Предложен е модел за контрол на скоростта на движение на автономната платформа, базиран на сензор за инерциална навигация (MEMS) и с прилагане на обратна връзка по затворен контур.

Разгледани са вградените в използваното устройство за инерциална навигация (IMU) средства за филтриране на сензорния шум – цифров нискочестотен филтър (DLPF). Приложена е софтуерна реализация на трансформация на Фурие за определяне на характерните смуцаващи честоти при движение на наземната автономна платформа.

Предложени са иновативен софтуерен подход и изчислителна процедура с прилагане на адаптивен цифров филтър в процеса на контрол на движението на автономна платформа.

Предложен е оригинален метод за пространствена компенсация на отклоненията в показанията на магнитометричен сензор. Методът е приложим за всички конструктивни варианти на автономни платформи, при които магнитометричният сензор е физически отделен от сензора с акселерометрично и жirosкопичо действие.

Предложеният метод е апробиран и в резултат е получена числена оценка за подобрението в точността на резултатите при определяне на азимута на движение на наземната автономна платформа.

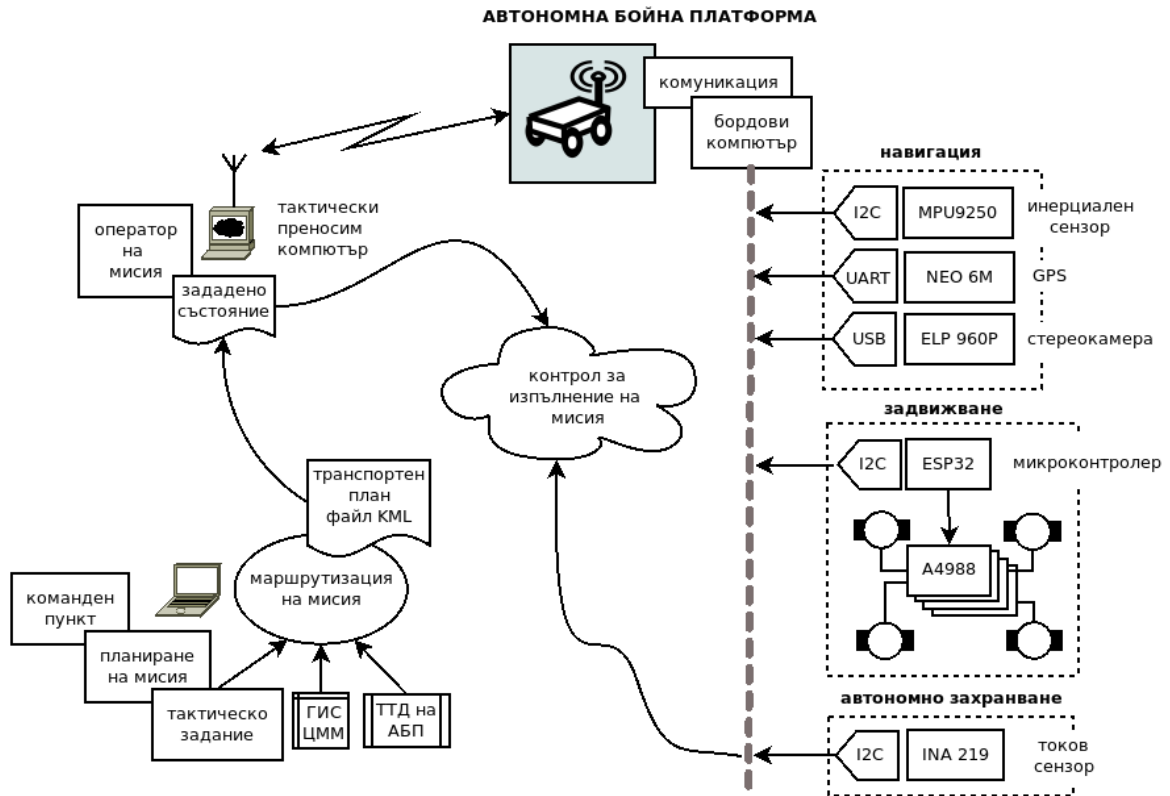
ГЛАВА 4: Анализ на бойни възможности при изпълнение на задачи на местността

Изследванията, проведени във втора и трета глава позволяват в рамките на обобщената структура на дисертационния труд, да бъде предложена архитектура за маршрутизация и провеждане на контрол на движението на автономна бойна платформа. В графичен вид предложената архитектура е представена на фиг. 4.1.

Архитектурата е съобразена със съвременните виждания за ползване на автономни апарати при подготовка и провеждане на бойни действия. Обособени са три основни функционални компонента, чрез взаимодействието на които е възможно изпълнение на задачи в рамките на бойна мисия. Основните функционални компоненти са: команден пункт, оператор на мисия, и автономна бойна платформа.

В командният пункт, който може да се намира на различно ниво в йерархичната верига на командване и управление, въз основа на постъпило тактическо задание се извършва планиране на бойна мисия.

Операторът на мисия е звено в изпълнителския клон на системата за командване и управление. На разположение на оператора на мисия е тактически преносим компютър. С използване на този компютър изпълнителите военни специалисти получават транспортния план за изпълнение на бойната мисия. Транспортният план представлява зададеното състояние в началото на изпълнение на мисията.



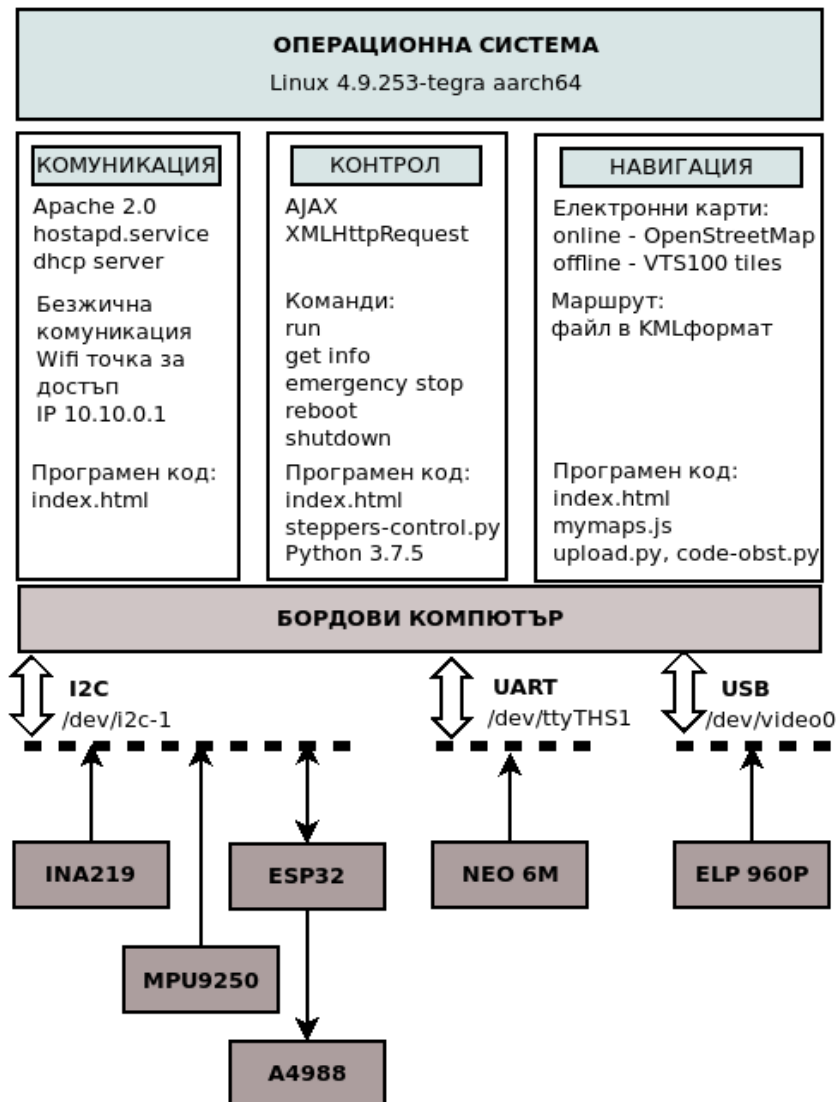
Фиг. 4.1. Архитектура на система за маршрутизация и контрол на движението

Бордовият компютър на автономната бойна платформа е от тип SBC (Single Board Computer) и се явява интегриращо звено на всички подсистеми. Бордовия компютър работи под управлението на стандартна операционна система от тип Linux, с предварително инсталиран системен, и приложен софтуер, и конфигуриран автоматизиран достъп до периферните сензорни и изпълнителни устройства.

Експериментална постановка за провеждане на моделни изследвания

На фиг. 4.2. схематично е показана архитектурата за изграждане на бордовата система на автономната бойна платформа. Основният модул в системата е бордовия компютър. Хардуерът на бордовия компютър е от тип SBC и конкретно е използван разпространения модел Jetson Nano. Посоченият хардуер е замислен по-скоро като специализирана за видео-обработка среда, с повишени графични възможности. Прилагането на този хардуер в модулите за управление на автономни

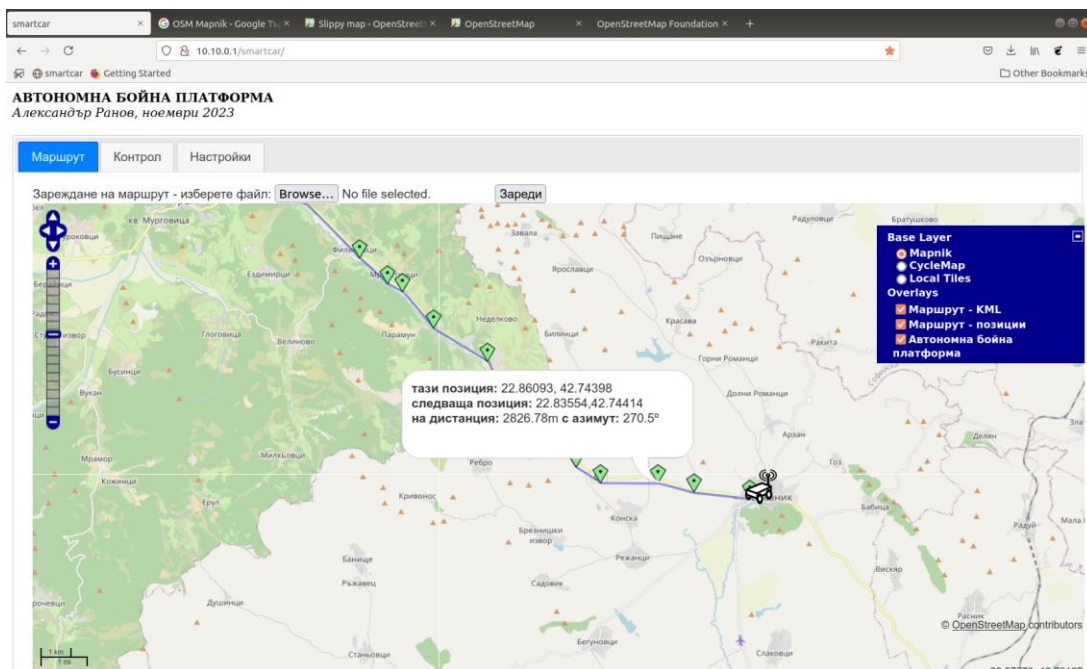
система е желано от разработчиците на подобни устройства поради компактния размер, ниско тегло, нисковолтово захранване, и всички необходими цифрови интерфейси към сензорната и изпълнителната подсистема.



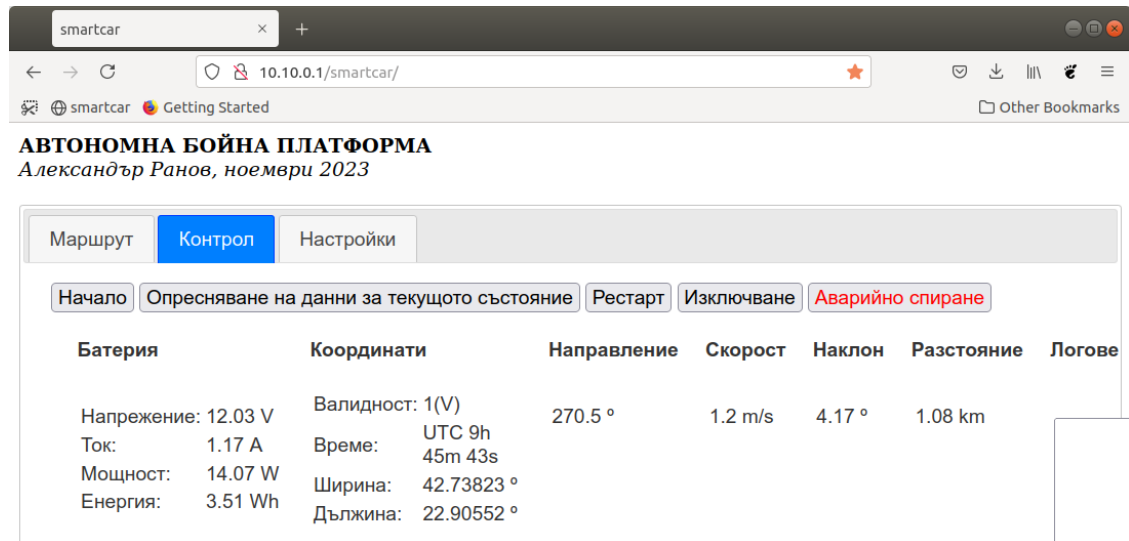
Фиг. 4.2. Архитектура на бордовата система

На фиг. 4.3 е показан екран с интерфейса на навигационната подсистема на автономната бойна платформа. В процеса на подготовка за мисия, операторът зарежда транспортен план (маршрут), като за целта с бутонa “Browse” указва подаден от командния пункт файл във формат KML. Операторът избира режим на визуализацията на електронната географска карта. От екранното меню изборът на основния слой за изобразяване е между визуализацията на Mapnik, CycleMap и LocalTiles. Първите две визуализации на електронни географски карти са от системата на гео-информационната база от данни на OSM (OpenStreetMap), широко използван проект от инициативата на OpenStreetMap Foundation [84]. В случай на липса на Internet свързаност, което би била очаквана ситуация в реална постановка, базовата визуализация на електронна географска карта е в

offline режим. Електронните картни слоеве от системата VTS100 на Военно-географската служба на Българската армия за района на придвижване са конвертирани във вид, съвместим за визуализация във формат OSM Tiles, и физически се намират във файловата система на бордовия компютър.



Фиг. 4.3. Изглед от екрана на навигационната подсистема



Фиг. 4.4. Контролен интерфейс на автономната платформа

Процедурите за контрол на движението на автономната бойна платформа се осъществяват чрез изпълнение на подавани през web интерфейса команди (фиг. 4.4), и автоматично взаимодействие между сензорната и изпълнителната подсистема. Командите от web страницата се изпълняват в сърверната част на системата на бордовия компютър чрез програмно генериране на заявки по системата AJAX (Asynchronous JavaScript and XML), която с прилагане на javascript

функционалността XMLHttpRequest прави параметризирано обръщение към програмния код `steppers-control.py`.

За стартиране за движение по вече зададен маршрут е предвиден бутон „Начало“. За преминаване към следваща контролна точка от маршрута към микроконтролера ESP32 се подават форматиранни данни за скорост, дистанция и ускорение при тръгване и спиране за лявата, и съответно дясната група електромотори. Микроконтролерът комуникира с бордовия компютър по информационния канал I2C, с помощта на модифициран `firmware`, който го представя като устройство от тип I2C slave[91].

Данните за текущото състояние на автономната платформа се изискват от системата на бордовия компютър с бутон „Опресняване на данни за текущото състояние“, което стартира командата `get info`. С изчитане на показанията на токовия сензор INA 219 са визуализират текущите стойности на напрежението, подавано от автономното захранване, стойността на текущата консумация на електрически ток, моментната консумирана мощност, и изразходваната от началото на движение електроенергия. Функцията `emergency stop` (бутон “Аварийно спиране”) може да бъде задействана по решение на оператора, или в случай на критично спадане на напрежението в системата за автономно захранване.

Подобряване на способностите за изпълнение на транспортно-бойни задачи

В създадения експериментален модел на автономна бойна платформа бордовият едноплатков компютър е с наличен електронен носител на операционната система и специализираното програмно осигуряване микро SD (Secure Digital) карта с типичен обем за съхранение на информация от 32 GB.

При аварийно отпадане на захранването, или в бойни условия (радиоелектронно противодействие със средства на РЕБ от страна на противника), електронния носител – SD карта на операционната система и инсталираното специализирано програмно осигуряване, е застрашена от повреда.

С цел осигуряване на без проблемно провеждане на експерименталната работа по дисертационното изследване, напълно конфигурираната и проверено работоспособна SD карта е резервирана.

Експериментите за резервиране (`backup`) и възстановяване (`restore`) са извършени в среда на операционна система Linux на настолен компютър. Представена е диаграма на последователността от действия за създаване на резервна SD карта, със средства на използваната операционна система.

Енергетични характеристики

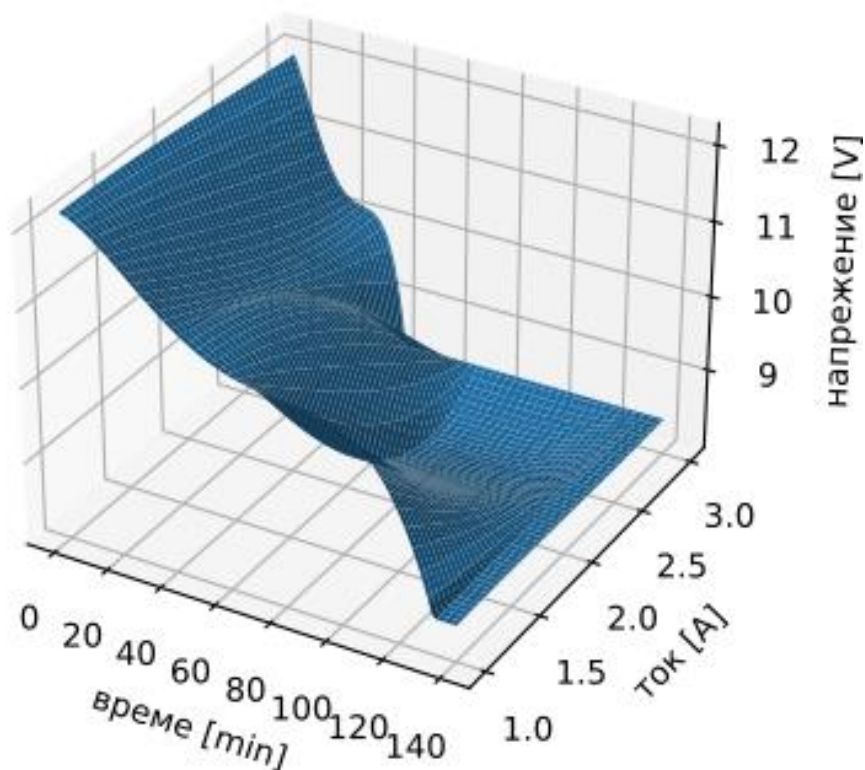
От автономната бойна платформа с електрозадвижване се очаква след извършване на предварителна подготовка да бъде постигната

целта на поставената транспортно-бойна мисия. Автономната платформа трябва да измине определено разстояние, спазвайки зададен маршрут, и в рамките на предвиденото време. В идеални условия, без въздействие от страна на противника и инцидентни технически повреди, изпълнението на мисията е в пряка зависимост от наличието на достатъчно енергия в системата на автономното електрозахранване.

В използвания за експерименти физически модел на автономна бойна платформа електрозахранването е от вид LiIon (Lithium - Ion) батерия по схема 3S с общо номинално напрежение от 12 V и деклариран капацитет 2000 mAh, типоразмер 18650.

Товарна характеристика на единична LiIon клетка със същия капацитет е публикувана в източника [37]. Въз основа на публикуваните данни, и с прилагане на софтуерен код (Приложение № 4.3) е създадена дигитализирана товарна характеристика в 3D формат показана на фиг. 4.9.

Физическият модел на електрозадвигвана автономна бойна платформа, създаден за експериментална дейност в настоящето изследване по докторска програма „Автоматизирани системи за обработка на информация и управление“, е замислена основно за апробиране на процесите на информационно взаимодействие при маршрутизация и провеждане на контрол на движението. Без да се навлиза в теоретични постановки от други научни специалности, оценката на енергопотреблението при изпълнение на транспортно-боев план би могла да се основе на практическо снемане на т.н. „външна скоростна характеристика“, дискутирано в цитирания материал. [13]

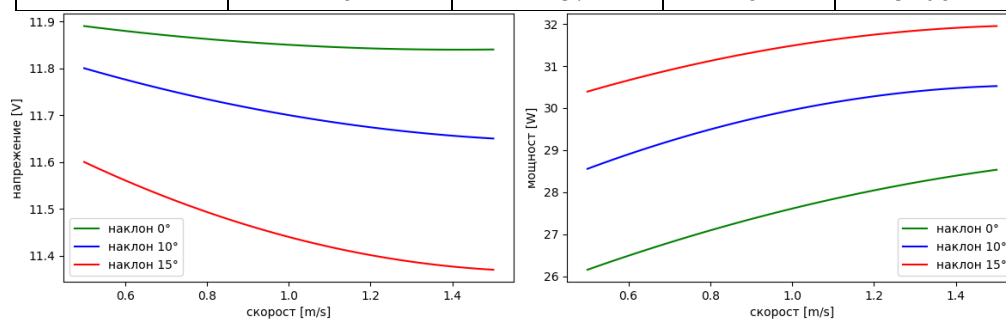


Фиг. 4.9. Дигитализирана товарна характеристика в 3D формат

На таблица 4.2 са представени експериментално получени стойности за външната скоростна характеристика, при движение под различен наклон и със зададена различна скорост. Данните са получени с пряко измерване на електрическите величини от бордовия сензор INA 219, и допълнителен измервателен уред. Стойностите са усреднени за периода на всяко измерване.

Таблица 4.2. Експериментално определени стойности за външна скоростна характеристика

Наклон	Скорост[m/s]	U[V]	I[A]	P[W]
	0.5	11.89	2.20	26.16
	1.0	11.85	2.33	27.61
	1.5	11.84	2.41	28.53
	0.5	11.80	2.42	28.56
	1.0	11.70	2.56	29.95
	1.5	11.65	2.62	30.52
	0.5	11.60	2.62	30.39
	1.0	11.44	2.75	31.48
	1.5	11.37	2.81	31.95



a)

b)

Фиг. 4.10. Външни скоростни характеристики по напрежение и мощност

Методика за определяне на възможността за изпълнение на зададен маршрут

Възможността за цялостно преодоляване на зададения маршрут, при общо възложена скорост за придвижване се определя от моментното ниво на хранящото напрежение. Могат да се дефинират два основни фактора за успех на транспортно-бойната мисия: обща енерговъоръженост, и моментно претоварване. За нормално функциониране на бордовия компютър, нивото на хранящо напрежение не трябва да спада под 8.5 V, за всички участъци от маршрута. Същевременно, с нарастване на времето на движение, в порядъка на изчерпване на капацитета на акумулаторната батерия, подаваното напрежение прогресивно спада, видимо от графиката на фиг. 4.9. Експериментално снетата скоростна характеристика, във вида показан на фиг. 4.10 а) графично показва зависимостта между

възможността акумулатора да поддържа напрежение в условията на различно натоварване, предизвикано при движение.

Нека с U_i е означено напрежението, което се очаква да бъде налично при преодоляване на i -тата отсечка от зададения маршрут.

$$U_i = U_{(v,\gamma_i)}, \quad (4.1)$$

където U е функционалната зависимост, графично показана на фиг. 4.10 а).

Нека с U_{\min} е означено минималното допустимо работно напрежение, определено със стойност от 8.5 V.

Тогава условието за работоспособност по моментно претоварване е във вид:

$$\min(U_i) > U_{\min} \quad (4.2)$$

Общата енерговъоръженост на системата за автономно хранване трябва да бъде достъпна за извършване на исканото преместване, изразено като механична работа.

Нека маршрута за придвижване е дефиниран с N на брой елементарни отсечки. За всяка i -та отсечка, $i = 1 \dots N$ в процеса на маршрутизиране са определени:

S_i – разстояние за придвижване;

γ_i – наклон за изкачване;

$v_i = v$ – зададена скорост на движение;

$\Delta\alpha_i$ – промяна в азимута на посоката на движение;

$\omega_i = \omega$ – ъглова скорост при промяна на посоката на движение;

r – радиус на завиване при промяна на посоката на движение.

Тогава теоретично необходимата енергия A_v се определя по израза:

$$A_v = \sum_{i=1}^N \left(P_{(v,\gamma_i)} \frac{S_i}{\cos\gamma_i v} + P_{(v=r\omega,\gamma=0)} \frac{\Delta\alpha_i}{\omega} \right), \quad (4.3)$$

и още:

$P_{(v,\gamma_i)}$ е моментната потребявана мощност съгласно графичното представяне на фиг. 4.10 б).

Зададеният маршрут е възможно да бъде постигнат при изпълнение на условието:

$$E > A_v, \quad (4.4)$$

където с E е означен заявеният капацитет на акумулатора на автономното енергозахранване, измерено във ват часове (Wh).

Едновременното изпълнение на условията по зависимости (4.2) и (4.4), осигурява възможността за изпълнение на зададения маршрут от автономната бойна платформа.

Изводи и резултати

Предложена е архитектура за маршрутизация и контрол на движението на автономна бойна платформа, съобразена със съвременните виждания за прилагане на автономни апарати при подготовка и провеждане на различни операции. За компонентите на архитектурата „навигация“ и „контрол“ е представена

експериментална постановка за провеждане на моделни изследвания. В експерименталната дейност е използван създаденият физически модел на автономна платформа.

Извършен е анализ на енергетичните характеристики на автономната бойна платформа. Известната товарна характеристика на ползвания във физическия модел енергоизточник е съпоставена с експериментално снета външна скоростна характеристика на автономната бойна платформа в различни режими на движение. В резултат на изследванията е предложена методика за определяне на възможностите за изпълнение на зададен маршрут.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното проучване по темата на дисертационния труд разкрива редица проблемни области в теорията и практиката на автономните системи. Обърнато е внимание на въпросите по прилагане на автономни системи във военната област.

Постигнати научно-приложни и приложни приноси:

1. Определен е математически апарат за извеждане на зависимостите „наклон” и „видимост” с използване на цифров модел на височината на земната повърхнина.

2. На основата на проведен математически анализ са дефинирани информационни структури „матрица на проходимост“ и „матрица на видимост“. Синтезиран е модел за обработка на информационните структури с резултат „матрица за скрито придвижване“ при маршрутизация на автономна бойна платформа.

3. С прилагане на модела за маршрутизация е разработен алгоритъм за съставяне на транспортен план на наземна автономна бойна платформа, без използване на съществуваща пътна мрежа и в условията на скрито придвижване спрямо известен противников наблюдателен пункт.

4. Моделът за маршрутизация е валидиран в разработено тестово софтуерно приложение. Приведени са графични и числени резултати, потвърждаващи работоспособност на модела.

5. Разработен е алгоритъм за откриване на некартографирани препятствия с прилагане на методи от „компютърно зрение“. Алгоритъмът е апробиран в специално създадено тестово обкръжение.

6. Разработен е математически модел на вектора на състоянието на автономна платформа. Предложен е модел за контрол на скоростта на движение с прилагане на обратна връзка по затворен контур.

7. Извършен е анализ на източниците на грешки при обработка на първични сензорни данни от модул за инерциална навигация. Предложен е оригинален подход за прилагане на цифрово филтриране при контрол на скоростта на автономна бойна платформа. Подходът е апробиран в частта му експериментално определяне на работни характеристики.

8. Предложен е метод за компенсация на отклоненията в показанията на магнитометричен сензор, предназначен за определяне на азимута в посоката на движение на автономна бойна платформа. Методът е апробиран с прилагане на пространствен графичен анализ върху експериментално получени данни.

9. Създадена е експериментална постановка за провеждане на моделни изследвания, и са снети енергетични характеристики при движение на физически модел на автономна платформа. На база енергетичните характеристики е предложена методика да определяне възможностите за изпълнение на зададен маршрут.

СПИСЪК НА СВЪРЗАНИТЕ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ПУБЛИКАЦИИ

[10]. Ранов А., Автономна бойна платформа и компютърно зрение, Международна научна конференция „Съвременни изследвания и технологии за отбраната“ ARTDEF 2022, стр. II-202 – II-210, ISSN 2815-2581.

[11]. Ранов А., Обработка на сензорни данни в автономна бойна платформа, СЮ ICT Media vol.7, година XV, ISSN 1312-5605, София 2020, стр. 80-84, 2020.

[19]. Alexander Kolev and Alexander Ranov. 2020. Software Improved State Control of an Autonomous Platform. In Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 101–105. <https://doi.org/10.1145/3407982.3408002>.

[90]. Ranov, Alexander, and Alexander Kolev. "A Security Approach to a Military Autonomous Platform Path Planning." *Information & Security: An International Journal* 50, no. 2 (2021): 193-203. <https://doi.org/10.11610/isij.5022>.