



МИНИСТЕРСТВО НА ОТБРАНАТА

ИНСТИТУТ ПО ОТБРАНА „ПРОФЕСОР ЦВЕТАН ЛАЗАРОВ”

инж. Лили Цветанова Павлова

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА ЕЛЕКТРОННО
БОЙНО ПОЛЕ С ЕЛЕМЕНТИ
НА ДОБАВЕНА РЕАЛНОСТ**

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

по докторска програма
„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 № 76/25.06.2024 г.

Дисертационният труд съдържа въведение, три глави с резултати и изводи към всяка една от тях, резултати и приноси на целия труд и заключение, изложени на 135 страници академичен текст, 57 фигури и 5 таблици, 9 приложения. Библиографията включва 111 наименования на български и английски език. Общият обем на дисертационния труд е 165 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 на 26.09.2024 г. от 14:00 часа в зала 210 на Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров”, гр. София, на открито заседание на научно жури в състав:

1. доц. д-р Григор Райков Велев
2. доц. д-р Севдалин Иванов Спасов
3. проф. д.т.н. Атанас Иванов Начев
4. доц. д-р Димо Тодоров Димов
5. полк. доц. д-р Иво Георгиев Радулов

Резервни членове:

1. полк. проф. д-р Николай Тодоров Стоянов
2. полк. доц. д-р Зарко Иванов Здравков

Научен ръководител:

доц. д-р Александър Асенов Колев

Автор:

инж. Лили Цветанова Павлова

Заглавие:

Визуализация на електронно бойно поле с елементи на добавена реалност

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

Научните и производствени организации, ангажирани с проекти в интерес на отбраната имат дългогодишни традиции в създаване, адаптиране и развитие на нововъзникващи и перспективни технологии. Възможността за наслояване на допълнителна цифрова информация върху зрителното поле на крайния потребител е високо оценено и използвано в конкретни военни приложения. Прилагане на разширено визуално възприятие на обстановката, в комбинация с цифрова комуникация за отдалечено предаване на данни е в състояние да подобри информираността за ситуацията според съвременните схващания за мрежово-центрична организация на бойните действия, да подобри разбирането за поставените задачи и да послужи за натрупване на споделен опит.

Като цяло крайният ефект цели намаляване на времето за реакция в критични ситуации, превантивно информиране на потребителите за предстоящи ситуации, съкращаване на командния цикъл за вземане на решение. В областта на системите за командване и управление, системите за управление на боя и на системите за управление на оръжия могат да се посочат разработки, стъпили на такива напреднали технологии.

ПРЕДМЕТ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Предмет на изследванията в дисертационния труд е прилагане на информационната технология „добавена реалност“ за разширяване на познавателните възможности в едно по-съвременно представяне на елементи на електронно бойно поле. Изследвани са възможните информационно-технологични подходи за реализация на системи с добавена реалност, изследвана е взаимосвързаността със съществуващи армейски информационни системи за командване и управление и е оценена възможността за прилагане в полеви условия.

ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Обект на изследванията е създаване на модел на разширено електронно бойно поле с основни компоненти визуализация и добавена реалност, с подсистема за идентификация на обект от интерес в зрителното поле на наблюдател с прилагане на инерциален сензор. На основата на проведен анализ на източниците на грешки при идентификация на обект от интерес са определени цифрови методи за стабилизиране показанията на инерциалния сензор. Изследвани са възможностите за идентификация на обекти от бойния ред и военни инфраструктурни обекти в зависимост от дистанцията им до наблюдателя.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Цел на дисертационния труд е да се предложи ефективен модел за разширено представяне на обекти от електронно бойно поле с прилагане на добавена реалност.

За постигане на така дефинираната цел са поставени за изпълнение следните задачи:

- Да се извърши преглед на известни приложения на информационната технология добавена реалност в гражданската и военната област;
- Да се определи сферата на приложимост на добавена реалност за прилагане в учебно-бойни условия при идентификация на обект от интерес и интегриране на допълнителна графична и/или текстова информация за подпомагане на изпълнението на определени тактически задачи;
- Да се анализират проблемите при военно приложение на добавена реалност с оглед адаптиране към съществуващи армейски комуникационни и информационни системи;
- Да се предложат подходи и алгоритми за достъп до данни за обекти от електронното бойно поле;
- Да се създаде формален математически модел на сензорната подсистема и да се предложи алгоритъм за идентификация на полеви обект;
- Да се направи оценка на ефективността на предложения алгоритъм при изпълнение на полеви задачи.

II. КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1: Информационна технология за добавена реалност

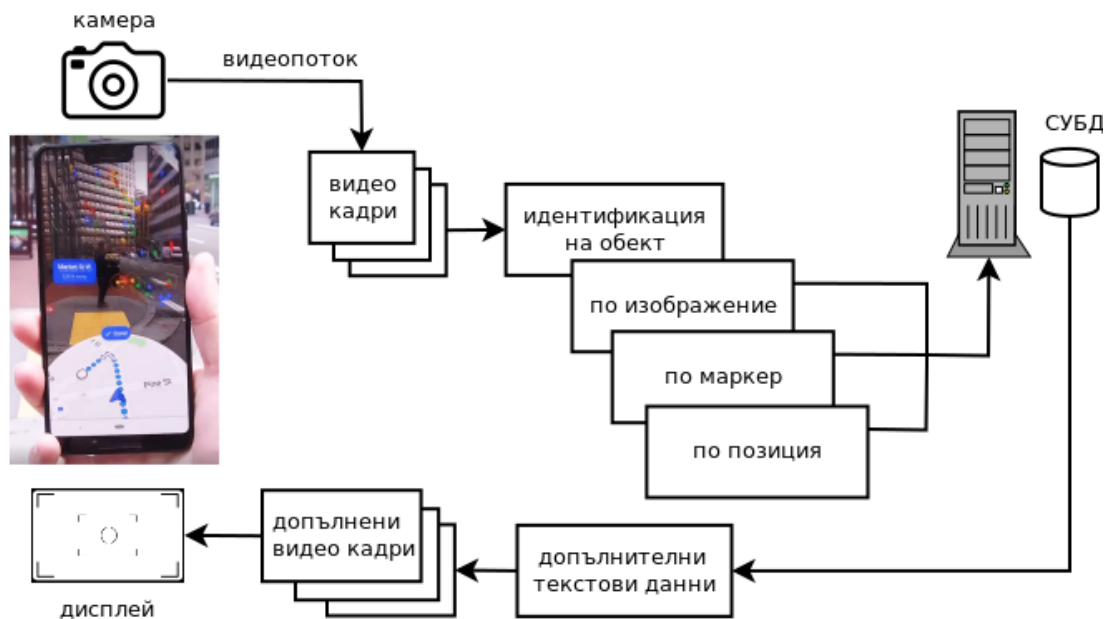
Съчетаването на елементи от реалния свят с виртуални аспекти се нарича добавена реалност Augmented Reality (AR). Тя е комбинация между виртуални обекти и обкръжаващата ни реална среда, т.е. допълва реалността, вместо напълно да я замества [7].

Дефиниция на терминологията от Ronald T. Azuma [89] “Добавената реалност позволява на потребителя да вижда реалния свят, с виртуални обекти, насложени или комбинирани с реалния свят“. AR допълва реалността, вместо напълно да я замества.

Развитието на инструментите и технологиите за събиране на геопространствена информация, паралелно с нивото на картографските методи и ГИС (Географска Информационна Система) технологиите, позволяват представянето на геопространствената информация от 2D карти в много по-достъпен, полезен и разбираем начин – под формата на реалистични цифрови модели. На фиг. 1.4.a е показана последователността на обработка на информацията в геоинформационно приложение.

Идентификацията на обект от интерес може да бъде по изображение, по маркер или по позиция.

Въпреки, че все още не е въведено като стандартно оборудване, за прилагане в американската армия се разработва система, известна като



Фиг. 1.4.а. Геоинформационно приложение

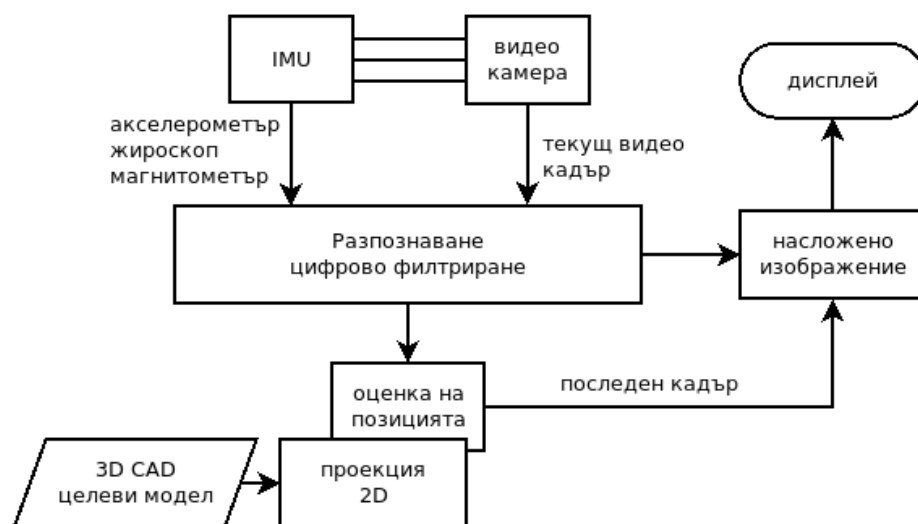
IVAS (Integrated Visual Augmentation System) [54, 101]. IVAS се базира на продукта Microsoft HoloLens [68] и ще разполага с разширен спектър от възможности, включително нощно виждане, термични изображения, идентификация свой/чужд на целта, достъп до навигационни данни и други. Друга система, наречена FBCB2 (ForceXXI Battle Command Brigade-and-Bellow) [72], е замислена принципно като система за управление на боя BMS (Battle Management System) на американската армия.

Публикацията [62], представя мобилно приложение, в което данни от инерциален сензор се комбинират с резултати от система за визуално разпознаване, за да се осигури стабилно проследяване на обект и отчитане на ориентацията му. На фиг. 1.6. е показано обобщено по [62] информационното взаимодействие при разпознаване на обект с въведено цифрово филтриране. Тази комбинация от различни методи преодолява недостатъците, свързани с прилагане на един или друг метод поотделно. Частта с визуалното разпознаване ползва алгоритъм на базата на цифрово филтриране, а за точна локализация се прилага математическа обработка на данните от инерционен сензор, който е вдвоен механично с видеокамерата. В цитираният материал е посочено, че за постигане на повторимост с добри резултати, отделните компоненти трябва да бъдат самостоятелно тествани и прецизно регулирани.

Приложението на горе описания метод за военни цели, с цел допълване на сензорната картина на цифрово бойно поле потенциално може да доведе до задоволителни резултати.

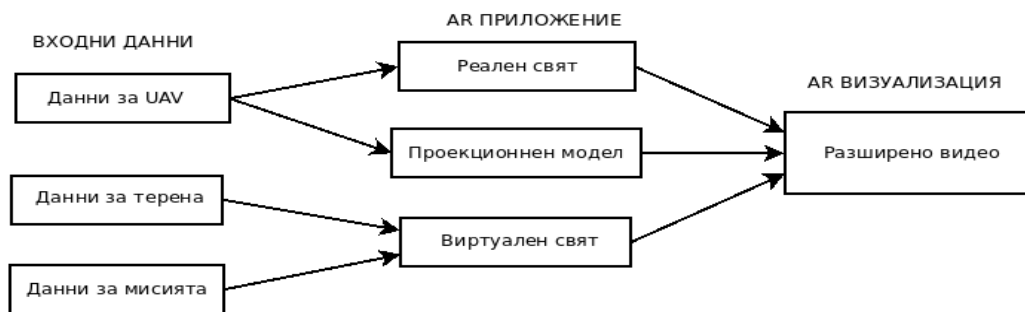
С разширяване на възможностите за обработка на данни и разширено графично представяне, броя на използваните приложения на добавената реалност в армията нараства експоненциално. Важен технологичен компонент е известен под терминът "heads-up" дисплей. В авиацията, цялата важна информация (данни за пространствена ориентация, насочване на оръжия, разпозната околна обстановка) се наслажда върху визъора на пилота, така че не се налага да отклонява погледа си към традиционните екранни панели, и през цялото време пилота има много по-добра ситуационна осведоменост.

Подобна разработката, насочена към сухопътните сили, е извършена от Центъра за изследване, развитие и инженерство на армията на САЩ (Communications-Electronics RD&E Center, CERDEC), който активно проучва потенциала на технологията за добавена реалност.



Фиг. 1.6. Комбинирано сензорно-визуално разпознаване

Безпилотните летателни апарати (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) са все по-използвани в най-различни сценарии, напоследък засилено в бойни мисии. Пилотите, обучавани и с придобити способности за управление на традиционни въздушни платформи трябва да адаптират уменията си, за да управляват UAV дистанционно от наземна контролна станция (Ground Control Station, GCS). Общата постановка на GCS е да предоставя визуална информация на отделни екрани: единият екран представя видео потока, подаван от бордовата видеокамера, докато другият екран показва информация за полетния план на мисията и различна информация, идваща от други сензори.



Фиг. 1.11. Входни данни, виртуализация и разширен видеопоток

Операторът на UAV е подложен на допълнително натоварване, понеже му се налага да наблюдава различни екрани. За да бъде избегнато натоварването от възприемане на информация, показана на два екрана, в материала [98] е предложена система с прилагане на AR технология. AR системата е предназначена за подпомагане на управлението на UAV при мисии на средна надморска височина и удължен маршрут (Medium Altitude Long Endurance, MALE). Има две основни функционалности: ориентация за придвижването на UAV по маршрута на полетния план и идентификация на целта.

Системата от [98] е структурирана в три различни модула, което е показано на фиг. 1.11. Един основен модул от системата е този за възприемане на входни данни; този модул обхваща обработката на данни идващи от UAV и наличната информация в GCS. Модулът за виртуализация с прилагане на AR обединява информацията от реалния и виртуалния свят, както и осигурява постигане на визуална съгласуваност на общото информационно представяне. Разработката на модула е с прилагане на софтуерната библиотека OpenSceneGraph [83]. Модулът за разширен видео поток представя на оператора визуално информацията, където виртуално добавените елементи носят своето семантичното значение.

В много от прегледаните дотук решения с прилагане на технологията на AR основен хардуерен компонент е устройството HoloLens на фирмата Microsoft [56].

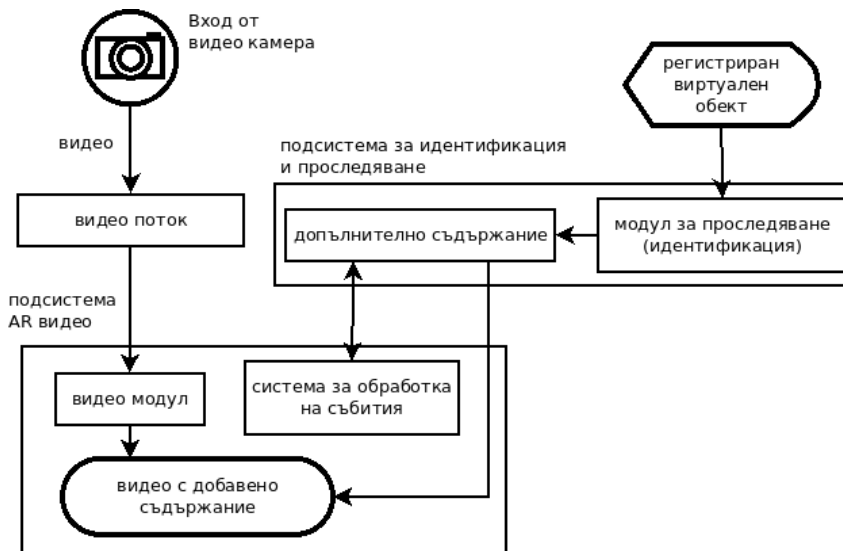
Обикновено се счита, че обектите на виртуалната среда, поддържани от AR, са предимно 3D компютърни графични модели, но по-голяма част от специалистите приемат друго определение, където виртуалната реалност може да се състои от 2D компютърно моделирани обекти, текст и изображения. В софтуерната индустрия има клон, който представя мултимедийно съдържание, а възможностите за визуално търсене и подобни разработки се популяризират като приложения на разширената реалност.

По-долу са описани някои понятия и термини, които играят важна роля в AR информационните технологии.

- Регистрация и проследяване описва наличните методи за подравняване на виртуален обект с триизмерни координати в реалния изглед. При приложенията за мобилни устройства проследяването на обекти включва или датчици за местоположение като GPS, цифров компас и сензор за ориентация (местоположение базирано проследяване) или система за разпознаване на изображения (оптично проследяване) или комбинация от двете. Тук под термина сензор за ориентация ще разбираме хардуерен модул, състоящ се от жирокоп и магнитометър.

- Виртуален обект. Някакъв вид цифрово съдържание, което се изобразява от приложението AR и се наслагва върху реалния изглед. Типичното съдържание включва 3D модели, 2D изображения, икони и текст. Типичният поток от данни в приложение за AR е показан на фиг. 1.16.

В концепцията за приложение на AR ключовият момент е идентификация и локализация на реален обект, който ще е част от добавената реалност. Модулът за проследяване от фиг. 1.16 (подобно

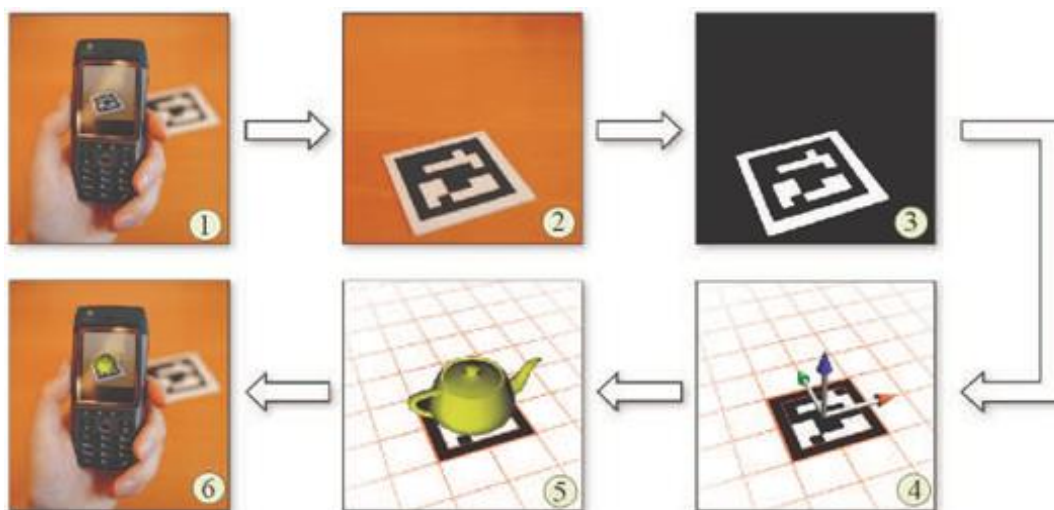


Фиг. 1.16. Поток от данни на AR приложение

на показано в [45]) е отговорен за идентификацията, където обикновено се използват два метода: оптично проследяване, известно като маркерна идентификация и проследяване на базата на местоположение, известно като безмаркерна идентификация.

Предизвикателството при разработването на AR софтуер е идентифицирането и проследяването на регистриран обект. Случаят на използване на последователност за идентификация на маркера е показан по-долу на фиг. 1.17, виж също [45, 110]. Последователността се разглежда в случая, когато мобилното устройство е смарт телефон. Първата стъпка течекогато AR зрителят наблюдава обкръжението чрез видеокамера. На стъпка две, ако картината е маркирана или търсен

обект е в ползрението, софтуерът AR започва процеса на идентификация. На трета стъпка наблюдаваната картина е бинаризирана и подготвена за разпознаване. Тук софтуерът AR търси в базата данни (DB), за да сравни представената картина с предварително регистриран виртуален обект. Ако съпадението съществува, тогава съответният виртуален обект е идентифициран. Следващата четвърта стъпка е важна в случая на съществуващ 3D модел на обект. На тази стъпка софтуерът AR разпознава пространствената ориентация на маркера и установява локална координатна система на модела.



Фиг. 1.17. Последователност при маркерна идентификация[45]

Идентифицирането на маркера завършва на пета стъпка, когато се инициализира съответният 3D модел с дефиниран мащаб, позиция и ориентация. И накрая (шестата стъпка), софтуерът AR създава комплексно видеоизображение, в което е добавено 3D изображение на разпознатия обект.

Обикновено стъпки 3 и 4 причиняват проблеми в описания по-горе подход чрез маркерна идентификация. Решението на тези проблеми се крие в прилагането на ефективни техники за обработка на изображения, напр. градиентни подходи за неподвижни изображения или стандартния подход KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) [93] за видео.

Вторият обсъден подход за идентификация и проследяване на виртуален обект е безмаркерна идентификация. Случаят на безмаркерна идентификация, базиран на геолокация, е показан на Фиг. 1.18.

Важни предварителни стъпки са определяне на позицията, определяне на посока на оптичната ос на камерата на устройството и извличане на данни за геометричните граници за всеки виртуален обект на интерес. Последното е показано на фиг. 1.18.

Текущата позиция на мобилното устройство на зрителя е посочена на фиг. 1.18 като lon , lat и h . Тук lon и lat представляват географските координати, дължина и ширина, а h е надморската височина на камерата на устройството над повърхността.

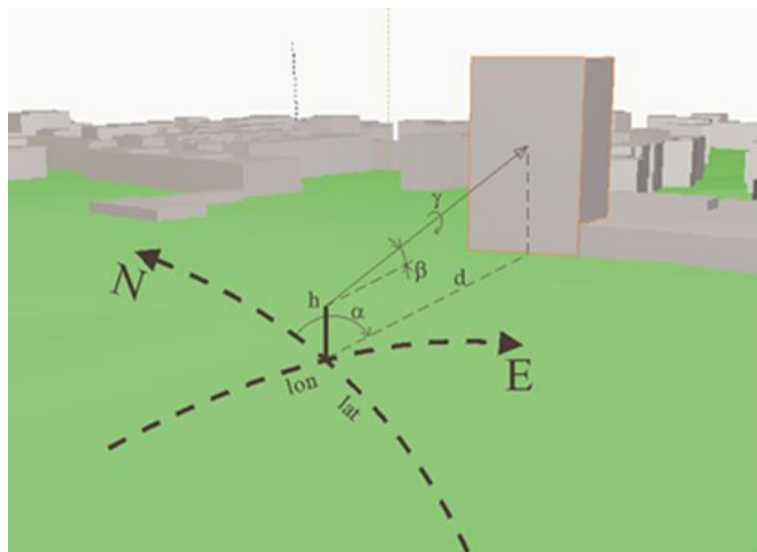
Определяне на текущата позиция на мобилния телефон с помощта на вградения GPS модул. Трудността на тази стъпка може да бъде забавянето при първоначалното установяване и присъщата грешка на този клас устройства. Трябва да се отбележи, че грешката във височината може да бъде значително по-голяма от грешката при определяне на координатите.

За този случай, посоката на оптичната ос на камерата обикновено се представя чрез определяне на така наречените ъгли на Ойлер.

Тези три ъгъла се оценяват от сензорите за ориентация вградени в мобилното устройство. Магнетометърът дава азимута (т.е. ориентацията на север). Ъгълът (към „мястото на целта“) може да бъде определен чрез жирокопа.

За да се определи дали оптичната ос на камерата е в границите на 3D модела на обекта, се предлага прилагане на така наречения метод на трасиращия лъч. Предложеният метод изчислява детерминанти на квадратни матрици. В случай на интензивни изчисления е важно да се съкрати времето за определяне на детерминантите на горното уравнение, без да се прекъсва работата на мобилното устройство.

Извършеният анализ на проблемни моменти в предишни експерименти в научно-изследователското поле на дисертационния труд показва, че основният и все още не-напълно решен въпрос е свързан с идентификацията на обекта на интерес в зрителното поле на мобилното устройство с AR приложение.



Фиг. 1.18. Безмаркерна идентификация базирана на географска локация [45]

Разгледано в пълен обем, реалното прилагане на информационно-технологични изделия с прилагане на AR, адресирано в сферата на сигурността и отбраната, показва съвкупност от различни решения в областта на хардуерен дизайн, комуникационна среда, оптична, сензорна и изчислителна подсистеми.

Научните изследвания и експерименталната работа в настоящия дисертационен труд са ограничени в рамките на научната специалност “Автоматизирани системи за обработка на информация и управление”, което води до ограниченията:

- Предмет на изследване са проблемните моменти при идентификация на обект на интерес, свързани с процеса на обработка на първичната сензорна информация от IMU;
- Комуникационната подсистема, в частта и достъп до бази от данни на C2 системи е компютърно симулирана в лабораторна обстановка;
- В експерименталната дейност е ползвана материална база, налична в Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров“, програмни продукти с отворен код, разпространявани под свободен лиценз и мобилни комуникационни устройства, достъпни в търговската мрежа.

Извършеният преглед на известни AR приложения в цивилната и военната област позволява да бъдат доуточнени детайли от поставените в началото изследователски задачи по настоящия дисертационен труд.

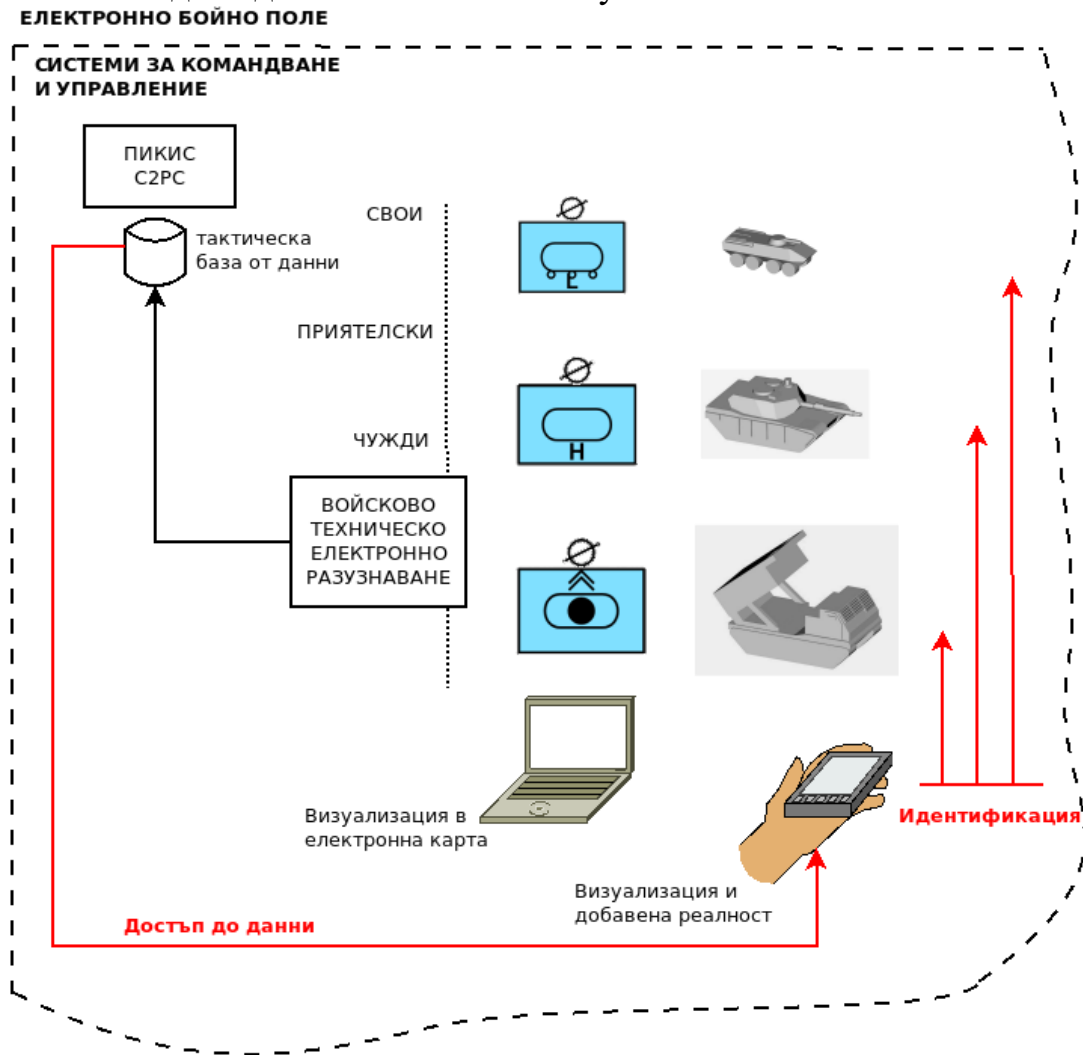
На фиг. 1.20 е схематично е показан предложението модел на разширено бойно поле. На фигурата с „Електронно бойно поле“ са представени компоненти на „Системи за командване и управление“. За представители на C2 системите са посочени известните и експериментално достъпни ПИКИС и C2РС. Прието е, че е съществува „Тактическа база от данни“, в която са налични актуални и достатъчно точни и подробни данни за разположените на полето свои, приятелски и чужди бойни сили и средства. Данните са налични от системи за войсково, техническо и електронно разузнаване.

В настоящето изследване е отчетено, че разпространените системи ползват визуализация в електронна карта. Преходът към разширено представяне на електронното бойно поле е развитие на подходите за визуализация с прилагане на AR.

Информационните механизми на AR, ориентирани към разширение на способностите за представяне на електронно бойно поле се концентрират в осигуряване на възможност за:

- Достъп до данните, съдържащи се в съществуващата тактическа база от данни;
- Идентификация, или съпоставяне на елементите от бойния ред, намиращи се в базата от данни с намиращите се в обсега на наблюдение на полевия командир бойни машини и обекти;

- Определяне на обхвата, в който системата за AR може практически да бъде ползвана в полеви условия.



Фиг. 1.20. Модел на разширено електронно бойно поле

Изводи и резултати.

В разглежданата област ва информационните технологии съществуват предпоставки за постепенно преминаване към по-високотехнологични принципи за визуализация и реализиране на усъвършенстван потребителски интерфейс, и това е преминаване към софтуерни решения с прилагане на добавена реалност. В главата са представени са виждания по важни практически аспекти на съвременните разбирания за електронното бойно поле, чрез включване на елементи от него във видеопредставяне от мобилно устройство в полеви условия. Постижимо е повишаване на информационните способности на командния състав, което е следваща стъпка за преминаване към все по-високотехнологична отбрана.

- Предложен е модел на разширено електронно бойно поле с информационен поток за пренос на специфични данни от съществуващите бази от данни на С2 системи към апаратната част на полеви мобилни системи с AR. Достъпът до подобен вид данни е

чувствителна информация в бойни условия и може да бъде осъществен към собствени бази от данни с предоставяне на минимално необходимите права за четене на данни.

- Дефиниран е минимален набор от данни: геолокация на елемента, принадлежност и тип на единицата бойна техника, за да бъде подпомаган командния състав в полеви условия с допълнителна текстова информация. От мобилното устройство с AR приложение се изисква при насочване на камерата на устройството към полеви обект, в зрителното поле да бъде изведена тази част от данните, отговаряща на визирания обект.

- Определен е методът за безмаркерна идентификация с ползване на данни за геолокация на обекта, текуща позиция на мобилното устройство и пространствената му ориентация, като подходящ в условията на военно приложение. Процедурата за правилна идентификация на полеви обект е от ключова важност за приложимостта на AR в полеви условия. Възможни неуспехи са свързани с изкривяване на сензорните данни за определяне на пространствената ориентация, или натрупване на изчислителна грешка в алгоритмичната реализация.

- Необходимо е провеждане на експерименти за да бъде определен обхвата, в който технологията на AR ще бъде полезна за подпомагане на дейността на командния състав в полеви условия.

ГЛАВА 2: Системи за командване и управление и електронно бойно поле

В терминологията, свързана с военната наука, системите за командване и управление заемат значително място. В процеса на навлизане и все по-голямо усъвършенстване, компютърните технологии стават неизменна и съществена част от най-общо системите за подпомагане вземането на решение и системите за управление на боя. Една обща характеристика на военните компютърните системи е, че по една или друга форма се създава електронен образ на обектите и процесите, протичащи при различни военни дейности. Събирането, съхранението актуализационната поддръжка на структурирана информация за обектите от бойния ред, съчетано с предимствата на електронната картография ни позволяват да говорим за електронно бойно поле.

Съвременните бойни машини са по-мобилни, смъртоносни и защитени, отколкото техните предшественици. Интегрирането на повече „на платформа“ оръжия, сензори, C4ISREW и системи за активна защита – ако не се управляват правилно – създава се ненужно когнитивно натоварване на екипажа на бойната машина [104].

Разгледаното решение е система за управление на боя (англ. BMS) в мрежова среда и интегрирано оръжие. Централизираният потребителски интерфейс съчетава всички платформени сензори и

ефектори, осигурявайки на командира и екипажа единен интерфейс за унифицирано и/или интегрирано получаване на ситуационна осведоменост. Системата за управление на боя е функционира на ниво платформа и на ниво екипаж на бойната машина. Увеличена е бойната ефективност на съвместно действащите единици от системата чрез модулна архитектура и обширна база от знания, което прави по лесно интегрирането с различни други платформи, сензори и крайни изпълнителни устройства



Фиг. 2.2. Система за управление на боя [104]

Интегрираното бойно мрежово решение за бойните машини се състои от сложни градивни елементи, включително цялостни С2 приложения, усъвършенствани компютърни терминали, тактически мултимедийни рутери и комуникационни системи. Предоставено е наистина интегрирано бойно мрежово решение за днешните бойни платформи, чрез съвременното си и доказано във въоръжени конфликти решение. Интегрира се успешно в разнообразни верижни и колесни платформи и с прилагане на широк спектър от оръжейни системи, сензори и комуникационни средства.

Ползвани са високопроизводителни изчислителни терминали, които работят като тактически компютри и дисплеи с различни конфигурации на софтуера и служат като потребителски интерфейс за екипажа на бойната машина. Разширени са възможностите на командира и стрелеца, включително откриване на видео движение, тактически наслагвания, показвани върху видео и визуален обмен между дисплеите на тактическите компютри.

Интегрирането на оръжие в BMS, е многофакторно и изпълнява основни функции като:

- Безпроблемна интеграция и взаимодействие на сензори, механизми и комуникационни системи.
- Единен човеко-машинен интерфейс (англ. Human Machine Interface, HMI) за обща оперативна картина, задействане на оръжие и сензори.
- Основани на изкуствен интелект (англ. Artificial Intelligence, AI) инструменти за подпомагане на вземането на решения за намаляване на когнитивното натоварване от командирите и екипажа.
- Разпределение на данни за целите в почти реално време.
- Улеснено интегриране с автономни платформи, безпилотни летателни апарати и механизми.

Системата за командване и контрол е предназначена да поддържа CP (Common Picture) единиците разгърнати в един оперативен сценарий при изпълнение на техните дейности. Тя е предназначена да поддържа командирите и техните състави да действат координирано и в сътрудничество, както и да бъде използвана в различни оперативни ситуации (хуманитарни действия, опазване на мира, налагане на мир, конфликти, и т.н.).

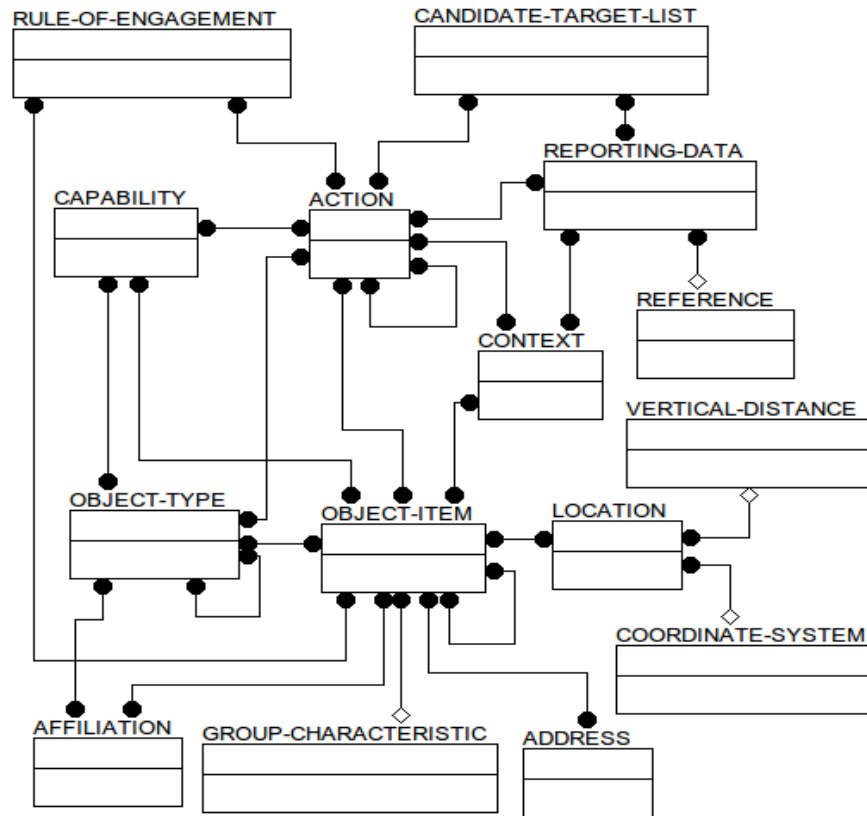
Една от основните цели на системата е да подобри времето за подготовка на съобщения, заповеди, доклади, чрез използването на високо автоматизирани и удобни за потребителя инструменти, както и времето за предаване на данни между или вътре в главната квартира чрез ефективно използване на наличните средства за връзка.

В случая на разработка на AR софтуер с военна цел, без да има конкретни изисквания към производителя и версията на използваната RDBMS (Relational DataBase Management System), препоръчително е прилагането, или осигуряването на достатъчна съвместимост с единен логически модел на данните.

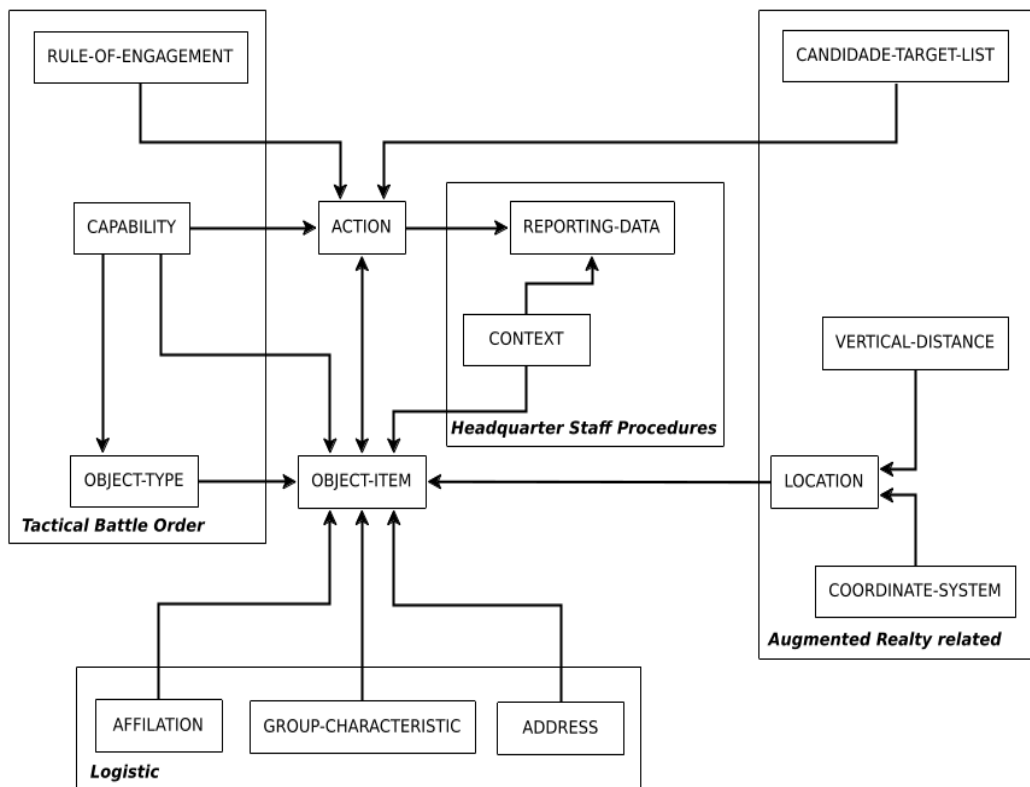
По публикувани свободно достъпни материали [103], логическият модел на връзките в препоръчителната база от данни е известен като Command and Control Information Exchange Data Model (C2IEDM).

Логическата структура от най-високо ниво на C2IEDM е представена на фиг. 2.4.

По отношение на географското си положение обектът се идентифицира с LOCATION. От друга страна, LOCATION е съставено от специфична COORDINATE-SYSTEM и допълнително VERTICAL-DISTANCE и може да бъде променлива величина във времето. ACTION обозначава уникална характеристика, с която описваме пространствено-времето поведение на обекта. От гледна точка на разширената реалност [31] (Фиг. 2.6), даден ITEM в обхвата на видеоизображението може да бъде допълнен с текстова информация като AFFILIATION, ADDRESS и CONTEXT. OBJECT-TYPE в системата C4I е специфична военна символика, докато в системата с добавена реалност може да бъде по-реалистичен триизмерен модел.



Фиг. 2.4. Логическа структура на C2IEDM [103]



Фиг. 2.6. База от данни с връзка към система AR

Проведеният детайлен анализ на приведената логическа структура на данните извежда на преден план основната функционална връзка ITEM-ACTION-LOCATION.

Анализ на подходите за информационен обмен.

Представените по-горе принципи за информационен обмен между отделни функционални модули в различни С2 системи дават обща представа за сложността на организиране на подобен обмен. Общо погледнато, широко ползвани са подходите:

- Форматирани текстови съобщения;
- Репликации на бази от данни;
- Локална база от данни;
- Централна/коалиционна база от данни;
- Програмен шлюз.

Подходът за информационен обмен с форматирани текстови съобщения е използван в някои от разгледаните случаи като основен, или заместващ канал за данни. Могат да се проследят различни варианти на реализация: по отношение на кодирането на текстовата информация – различни стандарти; по отношение на физическия обмен на по-ниско ниво – чрез системи за електронна поща, или протоколи за трансфер на файлове. Наличието на различни стандарти за кодиране на текстовите съобщения е затрудняващ момент за продължаване на изследванията по настоящия дисертационен труд.

Обмена чрез репликация на база от данни може да се определи като по-високо технологичен от информационна гледна точка. Информационните технологии на RDBMS са развити в достатъчна степен, за да покрият изисквания не само в гражданската, а и във военната област. На програмно-софтуерно ниво съществуват фирмени, както и свободно достъпни и с отворен код API (Application Programming Interface), с прилагане на които е възможен локален, както и отдалечен достъп до информация от RDBMS.

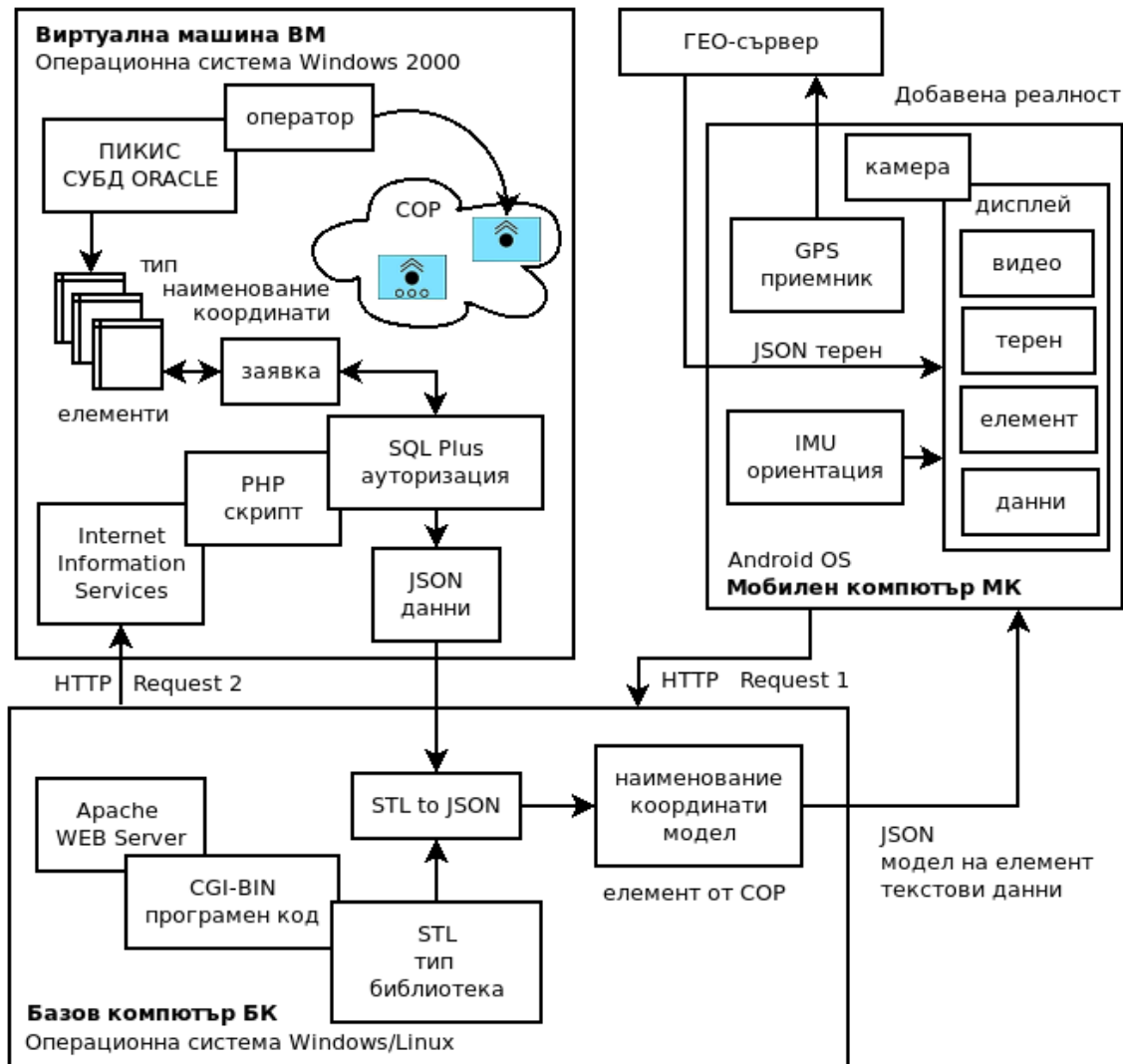
Прилагане на програмен шлюз е универсален подход за осъществяване на относителна съвместимост и обмен на информация между различни информационни системи. Успешните опити за прилагане на програмен шлюз в една или друга степен се свеждат от прилагане на софтуерни API. Програмният шлюз може да се посочи като следващо ниво във все по-сложната постановка за автоматизиран обмен на данни между системи от различни производители и стъпили на различни системи RDBMS и/или форматирани текстови съобщения.

Общото за всички описани подходи за обмен на информация е, че за легалната им реализация им в полза на трета страна, в случая за разширен информационен обмен към системи AR, необходимо е предоставяне на права за достъп и системни настройки.

Достъп към централизирана база от данни

На фиг. 2.15 схематично е представена последователността за обмен на информация между С4I система и мобилно устройство с

приложение за добавена реалност. Подробни данни и описание на експерименталната дейност са посочени в публикацията [19]. За целите на експеримента е създадена тестова среда, състояща се от базов компютър (БК), виртуална машина (ВМ) и мобилен компютър (МК).



Фиг. 2.15. Обмен на данни от СУБД ПИКИС

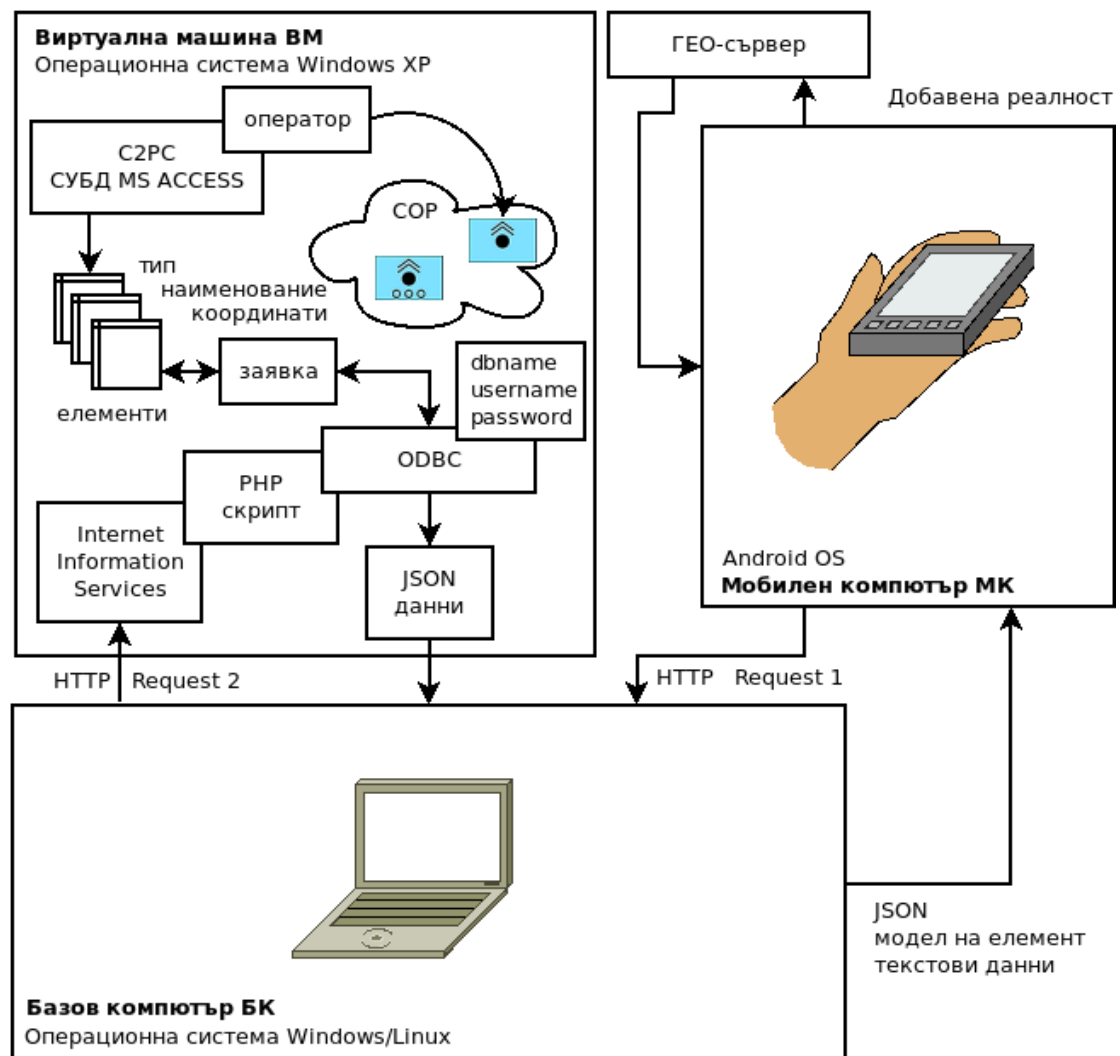
Компонентите БК и ВМ са разположени на една физическа компютърна платформа. На ВМ е инсталирана тестова версия на програмния продукт ПИКИС, с функционалност на С4I система. Машината ВМ е под управление на Windows 2000, на тази машина допълнително са конфигурирани Internet Information Services (IIS) и програмнен код на езика за WEB програмиране PHP. Изпълнимият модул SQL Plus е от състава на инсталационния пакет на ПИКИС.

Компютърът БК е основният компонент в тестовата постановка. В настоящия случай работи под управление на операционна система Linux Ubuntu 18, но няма изрично изискване за вида на конкретната операционна система. В конфигурацията на БК е добавен системния компонент Apache WEB server и е обявена папка CGI-BIN, в която са

намира програмния код, създаден за целите на експеримента. Важна част от осигуряването тук е библиотеката от типови триизмерни модели на елементите от COP, които подлежат на визуализация в системата на добавена реалност.

Мобилният компютър, означен като МК, е смартфон с операционна система Android. Експериментите са провеждани на няколко различни смартфона, с различни версии на мобилната операционна система. Тествани са вариантите с мобилна операционна система Android 4.2 и Android 11. В системата на МК е инсталирано тестово мобилно приложение, създадено за целите на настоящия експеримент. Мобилното приложение на наречено „Електронно бойно поле”. Приложението активно използва вградените видеокамера, GPS и сензори за инерциална навигация (Inertial Measurement Unit, IMU) и безжична свързаност на мобилното устройство.

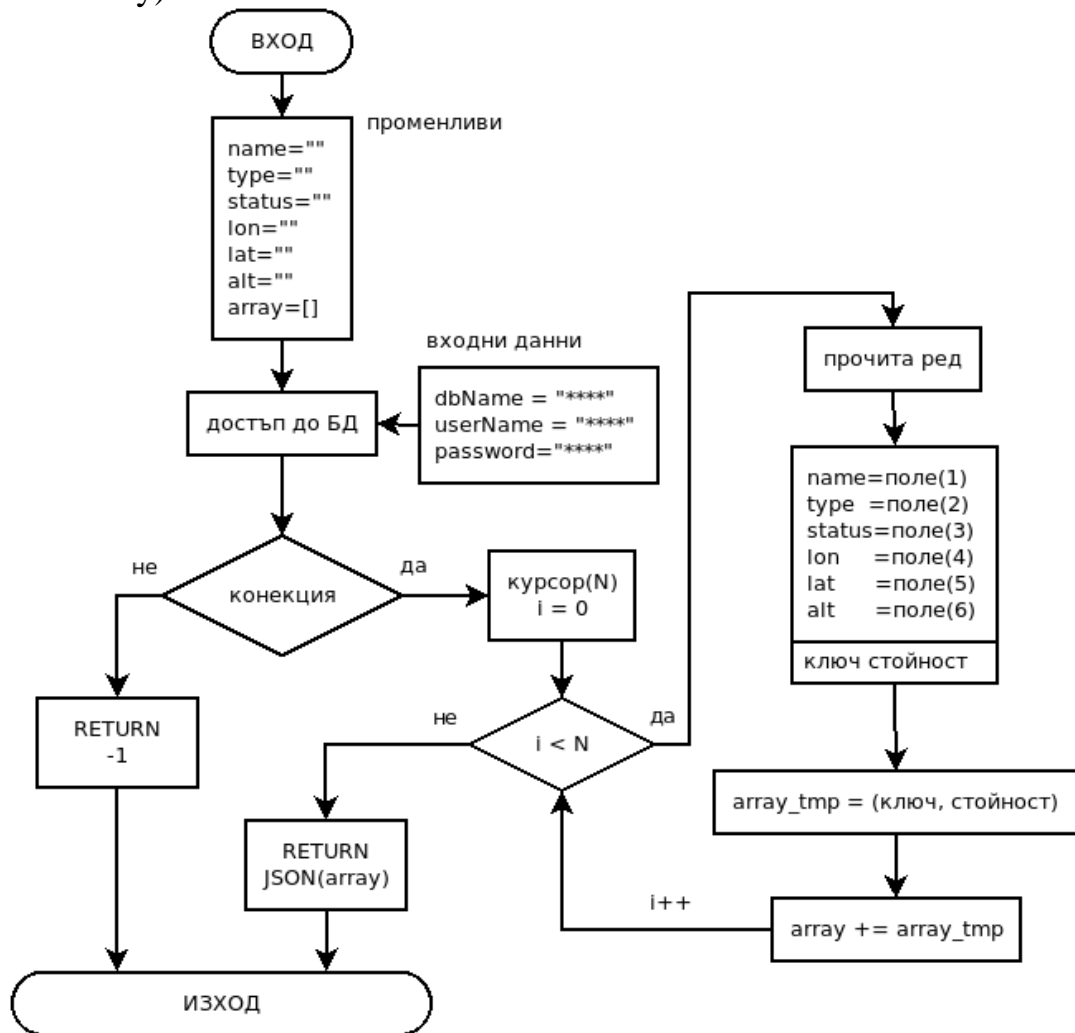
Достъп към системи с локална база от данни



Фиг. 2.17. Обмен на данни от СУБД C2PC

Подходящ пример за разглеждане на решение за достъп до локална база от данни е известната софтуерна система C2PC.

Показано на фиг. 2.17, софтуерните подсистеми БК и МК са заимствани от описаният по-горе метод за достъп до данни. Различава се по типа на използваната СУБД, която в разглеждания тук случай на локална база от данни е MS ACCESS. Виртуалната машина, на която е инсталирана системата С2РС е под управление на операционна система Windows XP, с конфигурирани IIS и скриптов език за програмиране във WEB среда PHP. Достъпът до локалната база от данни е осигурен с прилагане на стандартен програмен интерфейс ODBC (Open Database Connectivity).



Фиг. 2.21. Алгоритъм за достъп до локална база от данни

Ползването на интерфейса ODBC в съчетание с програмния език PHP изисква наличие на инсталиран в операционната система ODBC драйвер за достъп до базата от данни MS ACCESS.

Показаният на фиг. 2.21 алгоритъм отразява действието на програмния код, с който се извършва достъп до локалната база от данни, изчитат се данни и се форматира информационна структура от тип JSON, необходима за работа на модула за добавена реалност.

Дефинирани са променливи за идентифициране на обект от базата от данни (name, type, status), и свързани с този обект позиционни характеристики (lon, lat, alt). Достъпът до базата от данни се

осъществява с параметрите в променливите `dbName`, `userName`, `password`, на които са зададени необходимите и правилно определени стойности. Променливата `array` е масивът, в който програмата съхранява извлечените от БД стойности.

Конекцията към базата от данни с подадените параметри може да бъде успешна, или не. При неуспешна конекция програмата приключва без резултат и връща към извикващия процес стойност от -1.

При успешна конекция към БД се формира курсор, в който се съдържат N извлечени записа (реда) с очакваните за обекта данни. Формира се цикъл с управляваща променлива i , с начална стойност $i=0$. В тялото на цикъла се прочита всеки следващ ред от курсора, като съдържащите се полета в този ред се присвояват на съответните променливи. Формира се временен асоциативен масив `array_tmp`, в който всеки от елементите има формат “ключ → стойност”. Временния масив се присъединява към променливата `array`, управляващата променлива на цикъла i се увеличава с единица. Изходът от цикъла е при достигане на броя извлечени записи N . Последното действие е формиране на форматирания JSON текстов низ и връщането му към извикващия процес.

Изводи и резултати

Компютърните и информационни технологии заемат своето място във военното дело. Предимно като системи за командване и управление и системи за управление на боя наблюдаваме създаване на обширни бази от данни, носители на възможно най-пълна информация за обектите на бойното поле. Възможностите за визуализация на фона на системи за електронна картография говорят за съществуването на електронно бойно поле.

- Дефинирано е понятие за „електронно бойно поле“ като събирателна възможност на системите за визуализация с прилагане на електронна картография и кореспондиращата информация, съдържаща се в информационни масиви и системи за управление на бази от данни.

- Разкрити са в достатъчна пълнота структурата и функционалните особености на военни комуникационно-информационни системи. От приведените примери на полеви системи за командване и управление, както и на системи за управление на боя е изведено общо качество на разгледаните системи: визуализация на електронна картна основа е нанесени елементи от бойния ред.

- Определена е необходимост от преминаване към нов вид интерфейс за интензивно ползване на натрупаните данни от състава на електронното бойно поле, приложим в полева обстановка. Предпоставка за преминаване към информационната технология на AR е осигуряване на достъп до съответните бази от данни.

- В резултат на анализ на препоръчителни БД от типа на MIP е показано, че са налични необходимите информационни структури и

връзки, достатъчни за задействане на информационния механизъм на AR.

- Извършен е преглед на съществуващи системи за съхранение и обмен на данни във вид на репликация, форматиращи съобщения, програмен шлюз. Определен е адекватно работещ информационен механизъм за достъп до данни в съществуващи C2 системи на ниво RDBMS.

- Предложен алгоритъм и са приведени експериментални резултати при осъществяване на достъп до бази от данни от тип централизирана и локална.

ГЛАВА 3: Добавена реалност за разширено електронно бойно поле

Проведените проучвания и извършения анализ в първа глава извеждат метода за безмаркерна идентификация на обект от байното поле като възможно приложим в условията на полево използване при бойни мисии. В процеса на безмаркерна идентификация е необходимо да бъдат отчетени позициите на обектите от интерес, позицията на мобилното устройство със системата на AR и не на последно място направлението (посоката) свързваща наблюдателя с наблюдавания обект.

Сензорната подсистема с включване на сателитна навигация GPS и сензор за инерциална навигация IMU е отговорна за локализацията на обект от интерес при безмаркерна идентификация в система за AR.

Математическата теория за адекватна обработка на инерциални данни е широко разисквана в редица литературни източници [79, 90]. Нека приемем, че нашето IMU е 9-DoF, т.е. има триосен жirosкоп, акселерометър и магнитометър.

По-надолу в текста е показан базов математически модел [75] на зависимостите при отчитане на показанията на жirosкоп и акселерометър.

Модел на жirosкоп:

$$\omega = \hat{\omega} + \mathbf{b}_{g,t} + \mathbf{n}_g \quad (3.1)$$

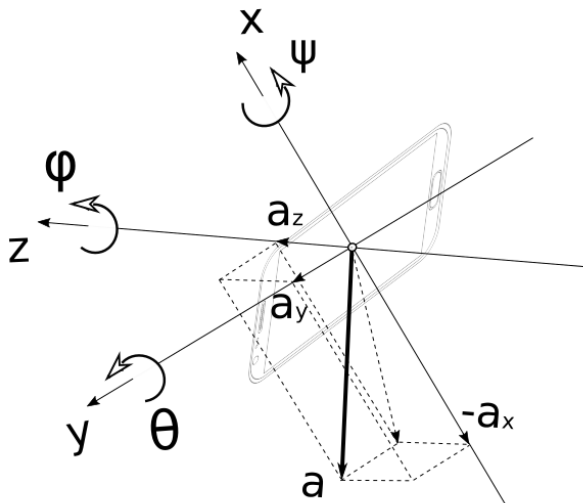
Тук в израза (3.1) с ω е означена измерената от жirosкопа ъглова скорост спрямо моментната ос на въртене, а $\hat{\omega}$ е идеалната ъглова скорост, която искаме да извлечем, $\mathbf{b}_{g,t}$ е отклонението в показанията на жirosкопа, което се променя с времето (дрифт) и други фактори като температура, \mathbf{n}_g е собствения шум.

Модел на акселерометър:

Показанията на акселерометъра се представят с израза:

$$\mathbf{a} = R^T (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{g}) + \mathbf{b}_a + \mathbf{n}_a, \quad (3.2)$$

където, \hat{a} е идеалното ускорение, което трябва да се вземе предвид при последващата обработка на данните, с g е означено оказващото влияние земно ускорение в избраната координатна рамка, b_a и n_a съответно отразяват смущенията в точността на показанията, предизвикани от температурни промени и собствения шум на устройството. Означението R^T в матричен вид указва взаимното положение на локалната координатна система на устройството спрямо избрана отправна координатна система.



Фиг. 3.1. Ориентационни ъгли и мобилно устройство

Определяне на ориентацията на мобилното устройство в пространството се свежда до калкулация на т.н. ориентационни ъгли, или заимствайки терминология от управление на полета на летателни апарати това са азимут, крен и тангаж. В случай, когато ще се ползват данните от акселерометъра, постоянно действащото земно ускорение, насочено към центъра на земята е в основата на тригонометрични пресмятания, които дават моментните значения на крена (англ. roll ϕ) и тангажа (англ. pitch θ) на мобилното устройство [33]. С показанията на магнитометъра се определя стойността за азимут (англ. yaw ψ).

На фиг. 3.1. е показана координатната система, привързана към мобилно устройство за AR. С прилагане на показанията на акселерометъра, предположително в покой и действие на земното ускорение, стойностите за тангаж θ и крен ϕ се определят по зависимостите (3.3, 3.4) при последователност на завъртане ZYX.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_z}{\sqrt{(a_y^2 + a_x^2)}} \right) \quad (3.3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_x} \right) \quad (3.4)$$

Прилагането на проекциите a_x , a_y , a_z на земното ускорение a за определяне на ориентационните ъгли, при покой на мобилното

устройство в тригонометричната интерпретация от изразите (3.3, 3.4) се влияят от допълнителните смущаващи фактори, източници на грешки, според израза (3.2).

Алтернативно, ориентационните ъгли в движение могат да бъдат определени с интегриране на ъгловите стойности на въртене на мобилното устройство, получени от показанията на жирокопния сензор.

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \omega_y \Delta t \quad (3.5)$$

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + \omega_z \Delta t, \quad (3.6)$$

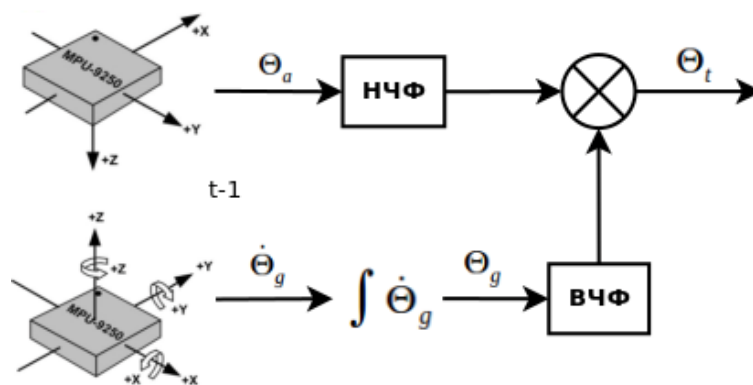
където с n е означена предишна стойност на определяния ъгъл, $n+1$ означава текуща стойност на определяния ъгъл, Δt е времеконстанта за извършване на численото интегриране. Изразите (3.3 ... 3.6) са съгласно [33] и отразяват независимо определяне на „Ойлерови“ ъгли. Тази форма на изразяване допуска математическа неопределеност в гранични случаи, известни като „gimbal lock“.

Разглеждайки преимуществено определянето на крена и тангажа, всички необходими изходни данни могат да бъдат получени от сензорите [11, 53, 62] както от акселерометъра, така и от жирокопа, и то независимо едно от друго.

Комплементарен филтър.

Един от методите [73] за достоверно определяне на пространствената локализация на устройството е обединяването на данните, които се придобиват при снемане на показанията на жирокопа и акселерометъра.

Отчитайки факта, че двата разглеждани сензора имат противоположна тенденция за натрупване на грешка при измерванията, прилагането на комплементарен филтър (Фиг. 3.2) повишава достоверността на калкулираните ъгли за крен и тангаж.



Фиг. 3.2. Комплементарен филтър

Общият вид на израза [41] за определяне на филтрираната стойност на ориентационен ъгъл спрямо една от осите в принципен вид е:

$$\Theta_t = (1 - \tau) \Theta_a + \tau (\Theta_{t-1} + \Theta_g), \quad (3.7)$$

където:

Θ_t – филтрирана стойност на ориентационния ъгъл;

Θ_{t-1} – предишна стойност;

Θ_g – моментна стойност според жirosкопа;

Θ_a – моментна стойност според акселерометъра;

τ – коефициент на времево съотношение.

Нека с ω и a са означени изходните измерени данни на жirosкопа и акселерометъра, изрази (3.8, 3.9).

$$\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T, \quad (3.8)$$

където ω_x , ω_y и ω_z са проекциите на ъгловата скорост по трите оси на локалната координатна система.

$$a = [a_x, a_y, a_z]^T, \quad (3.9)$$

тук a_x , a_y и a_z са проекциите на ускорението по трите оси на локалната координатна система.

Прилагането на нискочестотен филтър към показанията на акселерометъра е представено с израза (3.8):

$$\hat{a}_{t+1} = (1 - \alpha) a_{t+1} + \alpha \hat{a}_t \quad (3.10)$$

Прилагането на високочестотен филтър към показанията на жirosкопа е представено със следния израз (3.9):

$$\hat{\omega}_{t+1} = (1 - \alpha) \hat{\omega}_t + (1 - \alpha) (\omega_{t+1} - \omega_t) \quad (3.11)$$

В изразите (3.8, 3.9) с \hat{a} и $\hat{\omega}$ са означени установените (филтрирани) стойности на показанията в последователни моменти от времето t и $t+1$.

Вземайки предвид (3.3 ... 3.6) зависимост (3.7) за всеки от двата ориентационни ъгъла придобива вида:

$$\theta_t = (1 - \tau) \theta_{(\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z)}^a + \tau (\theta_{t-1} + \theta_{(\omega_y \Delta t)}^g) \quad (3.12)$$

$$\varphi_t = (1 - \tau) \varphi_{(\hat{a}_x, \hat{a}_y)}^a + \tau (\varphi_{t-1} + \varphi_{(\omega_z \Delta t)}^g) \quad (3.13)$$

Изразите (3.12, 3.13) са разширена форма на показаното в [73]. Отчита се, че стойностите на ъглите, получени от показанията на жirosкопа (θ^g, φ^g) са сравнително постоянни с времето, докато

стойностите на ъглите, получени с показанията на акселерометъра (θ^a, φ^a) подлежат случайни моментни отклонения. Коефициентът τ типично приема стойности:

$$0.5 < \tau < 1.0, \quad (3.14)$$

като практически определената му стойност, водеща до стабилно адекватно определяне на ориентационните ъгли е в зависимост също от стойността на интеграционния интервал Δt .

В отговорни за практиката приложения точните работни стойности за коефициента τ и времевия интервал Δt се определят експериментално [61].

Филтър на Калман

За работа на разгледания по-горе комплементарен филтър е въведен параметър, който определя кой от двата сензора, жirosкоп или акселерометър има по-съществено значение за точността на определяните ориентационни ъгли. Този параметър подлежи на настройка в зависимост от приложението на сензорите и не винаги дава максимално добри показатели. Друг вид подход за цифрово филтриране, известен като „филтър на Калман“ (англ. Kalman Filter, KF) [60] теоретично би постигнал оптимален резултат.

Разглеждаме система, в която са разграничени координатни референтни системи, означени с I, W и B. Инерциална (I), неподвижна (W) и на сензорното тяло (B). В повечето случаи координатните системи I и B съвпадат. При трансформация от една в друга координатна система се ползва специално означение, например ${}^B_A X$ означава трансформация на величините X от координатната система A към координатната система B. Очакваният резултат от прилагането на KF е да бъдат определени стойностите на ориентационните ъгли $[\varphi, \theta, \psi]^T$ в координатната система W.

Част от възприетата терминология при проектиране на системи с KF е „състояние“. Под този термин се разбира вектор от вариращи във времето величини [74] за описване на параметрите на дадена система. Важна позиция от работата на KF е да се извърши оценка на състоянието. Оценката се извършва като се търси минимум на квадратичната разлика между оцененото в предишна стъпка състояние и предположено „правилно“ състояние.

При използване на KF стремежа е да се оцени дадено състояние, като се вземат данните от един или повече сензори и се разполага с модел на процеса в системата в неговата динамика. Филтърът на Калман динамично оценява състоянието (наречено още „актуализация“) като отчита както модела на процеса, така и величините от измерванията на сензорите. Някои от величините, описващи състоянието е възможно да не могат да бъдат измерени, като например стойността на дрифта на жirosкопа. Процесът все още може

да бъде актуализиран, такова състояние, в което не всички величини са познати се нарича „разширено състояние“.

Филтърът на Калман работи на стъпки, които са актуализация на процеса и актуализация на измерването. В стъпката на актуализация на процеса се използват измерените от сензор величини и динамиката на системата, по този начин се предвижда бъдещото състояние. Бъдещото състояние също се променя с течение на времето, с отклонение, пропорционално на грешката, породена от неточности в модела на процеса. В стъпката на актуализация на измерването КФ ползва величините от измерванията на друг допълващ сензор, за да коригира грешката в предвиденото състояние. Понеже показанията на всеки от сензорите не може да бъдат считани за перфектно точни, трябва да бъде отчетен моделът на шумовите характеристики на сензорите. Поведението на сензорите се отчита още чрез матрица на средните стойности и ковариационна матрица.

Входът в работата на КФ е текущото състояние:

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \varphi_t \\ \theta_t \\ \psi_t \\ \mathbf{b}_{g,t} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

където векторът на състоянието \mathbf{x} е определен към време t и още: с $\mathbf{b}_{g,t}$ е означено отклонението в показанията на жирокопа.

Стъпка 1: Получени са текущите сензорни измервания на величините от жирокопа ${}^l\omega_t$ и от акселерометъра ${}^l a_t$.

Стъпка 2: Предвидено бъдещо състояние, с отчитане на динамичния модел на системата (актуализация на процеса).

$$\hat{\mu}_{t+1} = \mathbf{A}_{t+1}\mu_t + \mathbf{B}_{t+1}\mathbf{u}_{t+1}, \quad (3.16)$$

$$\hat{\Sigma}_{t+1} = \mathbf{A}_{t+1}\Sigma_t\mathbf{A}_{t+1}^T + \mathbf{Q}_{t+1}, \quad (3.17)$$

където: μ_t , Σ_t означават съответно осреднените стойности и ковариационната матрица на състоянието във време t ;

$\hat{\mu}_{t+1}$ и $\hat{\Sigma}_{t+1}$ означават средните стойности и ковариационната матрица на състоянието във време $t+1$;

\mathbf{Q}_{t+1} означава матрица на моделирания шум;

\mathbf{A}_{t+1} означава динамиката на процеса, математически модел на преминаването от състояние към време t към време $t+1$. Представена е като:

$$\mathbf{A}_{t+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

където Δt е интервалът от време между две последователни измервания t и $t+1$.

\mathbf{u}_{t+1} означава вектора на измереното състояние, в разглеждания тук случай това е скоростта на изменение на ориентационните ъгли в координатна система W . Представен е като:

$$\mathbf{u}_{t+1} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Трансформацията на вектора на състоянието от координатните системи I към W е показана с израза:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \quad {}^I \omega_t, \quad (3.20)$$

Където \mathbf{R} означава ротационна матрица:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\cos \varphi \sin \theta \\ 0 & 1 & \sin \varphi \\ \sin \theta & 0 & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

\mathbf{B}_{t+1} означава съответствието между вектора на измереното състояние (в дименсия ъглова скорост) към вектора на състоянието (в дименсия ориентационни ъгли). Представен е като:

$$\mathbf{B}_{t+1} = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Стъпка 3: Актуализация на измерването. В тази стъпка, ориентационните ъгли са измерени с отчитане на сензорните величини, получени от акселерометъра. Приложени са за преминаване към следващо, коригирано състояние чрез сливане на данни.

$$\mu_{t+1} = \hat{\mu}_{t+1} + \mathbf{K}_{t+1}(\mathbf{z}_{t+1} - \mathbf{C}\hat{\mu}_{t+1}), \quad (3.23)$$

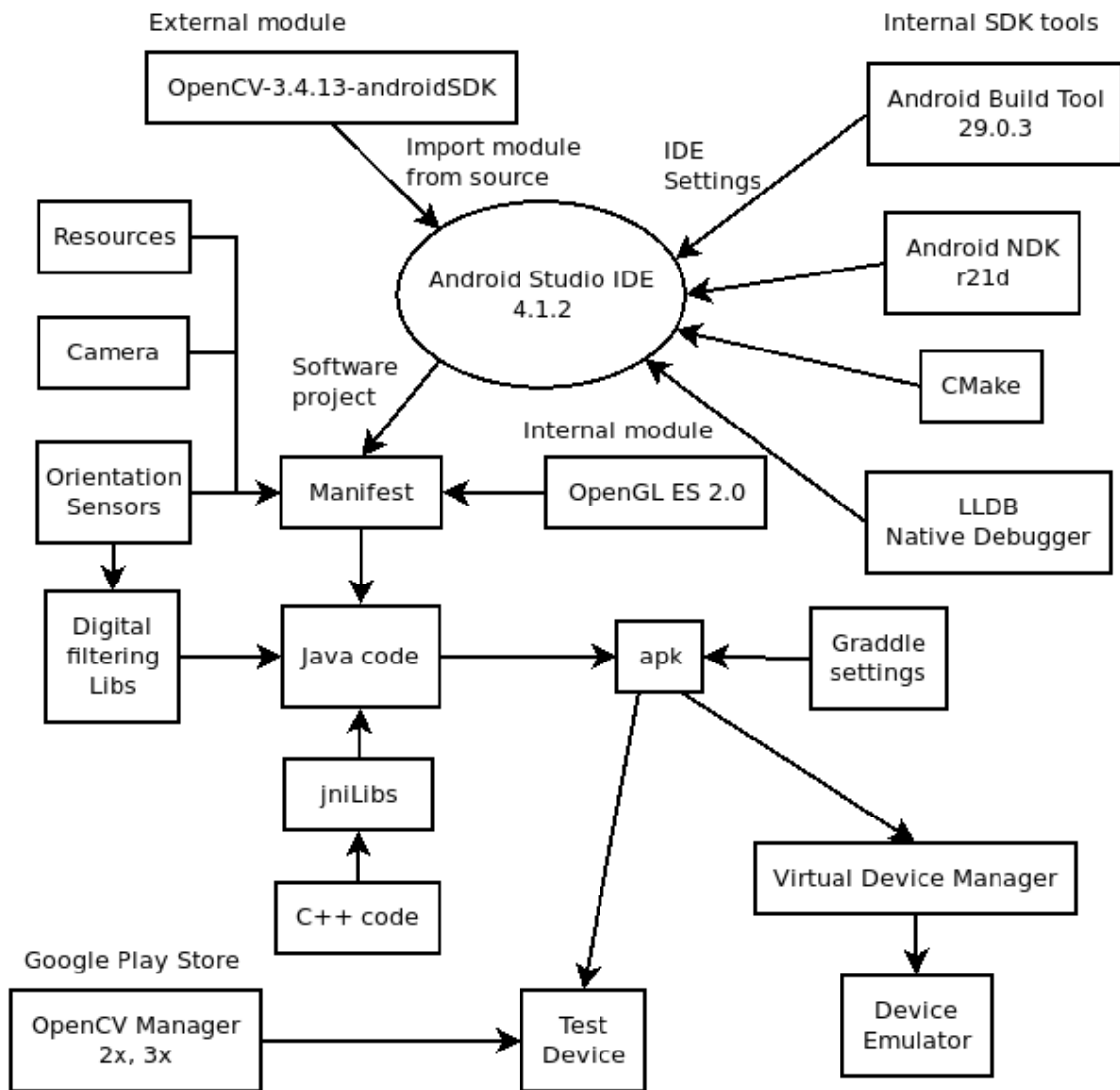
$$\Sigma_{t+1} = \hat{\Sigma}_{t+1} - \mathbf{K}_{t+1}\mathbf{C}\hat{\Sigma}_{t+1}, \quad (3.24)$$

където: \mathbf{K}_{t+1} изразява промяна на степента на корелация в показанията на сензорите;

\mathbf{C} изразява към преход от текущото състояние към следващото стабилно състояние;

Изразите (3.15 ... 3.24) са представяне на KF по [74] и още \mathbf{z}_{t+1} изразява ъгловите стойности на ориентационните ъгли, определени от текущите показания на акселерометъра с прилагане на зависимостите (3.3, 3.4).

Софтуерна архитектура на мобилно приложение с възможности за отразяване на добавена реалност.



Фиг. 3.3. Софтуерна архитектура на мобилно приложение

На фиг. 3.3 е представена софтуерна архитектура на мобилно приложение, предназначено за представяне на елементи с добавена реалност.

Основен компонент в предложената от автора софтуерна архитектура е свободно разпространявания продукт Android Studio. Специфично за това приложение са включени Digital filtering Libs – софтуерни библиотеки за цифрово филтриране на показанията на инерциални сензори за ориентация с източник [50, 92]. В процеса на визуализация на тестовото AR приложение се изисква върху видео кадър да бъде насложена допълнителна текстова и графична информация. В хода на експерименталната работа по настоящето научно изследване се оказва практически освен допълнително получената текстова информация, да бъде визуализиран също тримерния цифров модел на терена на близката околност, също и идентифицираните обекти от интерес от бойния ред, представени чрез свой анимиран тримерен модел.

Създаденото Андроид приложение е работоспособно в симулирана среда и е тествано с прилагане на Android Emulator, както и на реални мобилни устройства от различни производители.

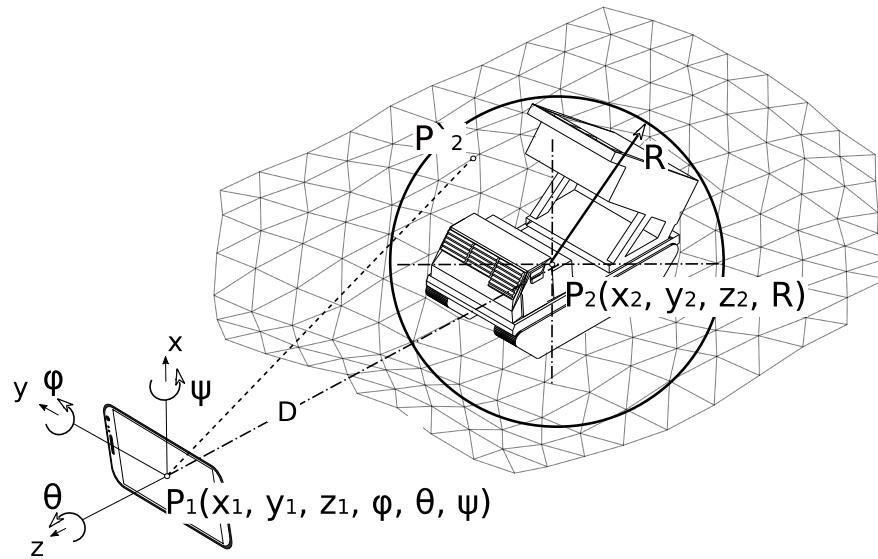


Фиг. 3.11. Екранна снимка при работа на приложението

На фиг. 3.11 е показана последователно изгледа на част от тестовия участък, снимка с камерата на реално мобилно устройство и резултатът от работата на приложението в режим на Android Emulator.

Алгоритъм за безмаркерна идентификация на обект от електронното бойно поле

Математическият апарат, представен в първа глава и изрази (1.1, 1.2) е работеща постановка за провеждане на безмаркерна идентификация с ползване на географска локация.



Фиг. 3.12. Постановка за безмаркерна идентификация с ограничителна сфера

Методът на трасиращия лъч връща множество възможни решения, и всяко от получените такива е необходимо допълнително да се определи за попадане в исканите геометрични граници.

В настоящето изследване се предлага алгоритъм за безмаркерна идентификация с прилагане на ограничителна сфера.

Показано на фиг. 3.12, приемаме, че познаваме позицията и пространствената ориентация на наблюдателя, позиция P_1 . Характеристиките на $P_1(x_1, y_1, z_1, \phi, \theta, \psi)$ са получени от вградените сензори на мобилното устройство.

Позицията $P_2(x_2, y_2, z_2)$ на обекта от интерес е определена с обръщение към съответната база от данни.

Входни данни P_1, P_2 .

Определяне на дистанцията между наблюдателя и обекта D с изрази:

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.25)$$

Определяне на позицията на тестова точка $P_2(x_2, y_2, z_2)$ с изразите:

$$x_2 = (s\theta s\psi + c\theta c\psi s\phi)z_1 + (c\theta s\phi s\psi - c\psi s\theta)y_1 + c\theta c\phi x_1 - D(s\theta s\psi + c\theta c\psi s\phi), \quad (3.26)$$

$$y_2 = (c\psi s\theta s\phi - c\theta s\psi)z_1 + (s\theta s\phi s\psi + c\theta c\psi)y_1 + c\phi s\theta x_1 - D(c\psi s\theta s\phi - c\theta s\psi), \quad (3.27)$$

$$z_2 = c\phi c\psi z_1 + c\phi s\psi y_1 - s\phi x_1 - Dc\phi c\psi, \quad (3.28)$$

където “s” означава $\sin()$, “c” означава $\cos()$.

Определяне на радиуса R на ограничителната сфера:

$$R = \frac{\max(\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m)}{2}, \quad (3.29)$$

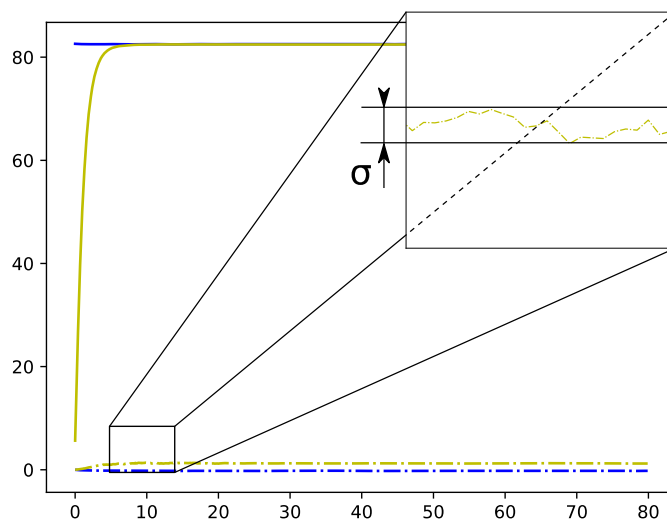
където $\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m$ са определени от данните, получени от тримерния модел на обекта от интерес.

Проверка за попадане на тестовата точка в ограничаващата сфера:

$$\text{dist}(P_2, P_2^{\wedge}) < R, \quad (3.30)$$

където с $\text{dist}()$ е означена процедура за определяне на дистанцията P_2, P_2^{\wedge} по зависимост, подобна на израза (3.25).

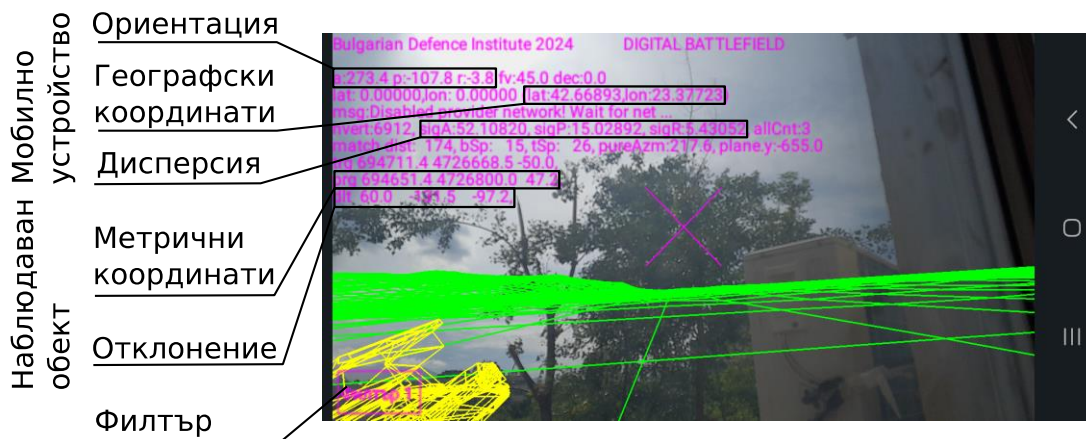
Дисперсията в ъгловите показания на сензорите от IMU, дори и след преминаване на обработка с дискутираните по-горе цифрови филтри, комплементарен и филтър на Калман, има своето осезаемо въздействие върху отклонението на тестовата точка. На фиг. 3.15 е показана диаграма, получена в хода на тестов експеримент за оценка на въздействието на цифровото филтриране.



Фиг. 3.15. Диаграма на дисперсията в отчитане на стойности на ориентационни ъгли

В хода на експерименталната работа специализираното Android приложение е допълнено с възможности за тестване на действието на цифровите филтри и диагностична подсистема.

Както е показано на фиг. 3.16, интерфейсът за управление на софтуера позволява превключване на вида използван в момента цифров филтър. Същевременно в екрана на приложението се отразяват текущи работни стойности, между които е дисперсията в ориентационните ъгли $[\varphi, \theta, \psi]^T$ и съответното отклонение в безмаркерната идентификация за дадена дистанция до наблюдавания обект. Потокът от диагностични данни се документира през безжична цифрова връзка към специално създаден за целта сървер за данни.



Фиг. 3.16. Диагностични данни в експерименталното Android приложение

На табл. 3.2 са представени определени числени стойности за максималната дистанцията d , на която работи безмаркерната идентификация, в зависимост от усреднена стойност на дисперсията на ъгловите отклонения σ_a , и специфичен радиус R_a при различни типове цифрово филтриране.

Таблица 3.2. Резултати за приложимост

Цифров филтър	Ъглова дисперсия	Обект от интерес	
		Стандартна цел $R_a=2.003$ m	MLRS M270 $R_a = 3.717$ m
Изключен	$\sigma_a=2.57^0$	$d=44.68$ m	$d=82.91$ m
Комплементарен	$\sigma_a =0.25^0$	$d=451.87$ m	$d=838.55$ m
Калман	$\sigma_a =0.80^0$	$d=142.38$ m	$d=264.22$ m

Изводи и резултати.

За подпомагане на полевата работа на командирите подходящи са мобилни устройства с вградени камера, дисплей, сензори за позициониране и ориентация, безжична свързаност. Едно такова устройство е разпространеното тип смартфон или таблет.

- Идентификацията на обект от интерес е основен компонент в процеса на прилагане на AR. Възприет е идентификационен метод, безмаркерна идентификация на геолокационен принцип, който предявява изисквания към сензорът тип IMU.

- Представен е базов математически модел на действието на IMU.

- Анализирани са възможните източници на нестабилност, рефлектиращи върху изкривени и грешни показания на жirosкопен и акселерометричен сензор.

- Изведена е необходимостта от прилагане на системи за цифрово филтриране на сензорните данни.

- Приведен е математически апарат за изясняване на действието на два типа цифрови филтри: комплементарен и филтър на Калман.
- Предложена е софтуерна архитектура и обектен модел на приложение за мобилно устройство с операционна система Android. Направен е избор на информационни структури за отразяване на терена, както и различни обекти от бойния ред, както и инженерно-строителни такива.
- Предложен е алгоритъм за безмаркерна идентификация на обекти от бойния ред.
- Създадено е тестово приложение за провеждане на експериментарна работа. Проведена е практическа верификация на алгоритъма за безмаркерна идентификация чрез експерименти на местността. Информационната технология за AR показва добри резултати, при допълване на изображението от видеокамерата с тримерен модел на заобикалящата околност.
- Проведено е изследване за влиянието на цифровите филтри върху степента на приложимост на AR в полеви условия. Приведени са числени данни за обхвата на стабилно идентифициране на обекти от бойния ред.
- Доказана е приложимост на информационната технология AR като подобрен интерфейс на електронно бойно поле в обхвата на изпълнение на тактически задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационната технология за добавена реалност е съвременен опит за разширяване на функционалността на различни системи за визуализация. Възможностите за привързване на специфична текстова и графична информация към реални обекти, наблюдавани в зрителното поле на видеокамера и съществено развитие в помощ на облекчено възприемане на околната картина. Приведените в настоящето изследване примери за прилагане на AR в почти всички сфери на човешката дейност показват високия потенциал на разглежданата информационна технология.

В аспекта на военното приложение AR е заела място в различни учебно-тренировъчни и специфична планиращи дейности. Проведеното проучване констатира, че не са публикувани данни, относно приложимостта на AR за непосредствено подпомагане на командирските дейности в полеви условия и по време на провеждане на учебно-бойни мисии. Предложен е модел за разширено представяне на обекти от електронно бойно поле с прилагане на AR.

Наличието на силно развити комуникационно-информационни системи и системи за управление на боя позволяват да говорим за електронен образ на обекти от бойното поле – това в настоящето изследване е наречено електронно бойно поле. Съществуват разработени системи от тип RDBMS към C2 системите, които на

информационно-физическо ниво поддържат необходимите данни и формират електронното бойно поле. Прегледът на системите за обмен и разпространение на информация, функционално необходими на работата на С2 системите показва голямото им разнообразие и различни подходи за реализация. Предвид поставената изследователска цел, необходимите данни за разширена визуализация на обекти от електронното бойно поле се постига с организиран достъп до RDBMS на С2 системи.

Алгоритмизиран е програмният достъп до бази от данни, типично ползвани в локален и централизиран сценарий. Проведени са тестове за извличане на необходимите за работа на AR данни, с обръщение към БД от тип ORACLE и БД тип ACCESS.

Като един от проблемните моменти в прилагане на AR технологията за разширено представяне е изборът на метод за идентификация на обект от интерес в наблюдаваната околност в полеви условия. Определен е методът за безмаркерна идентификация с прилагане на геолокация. Анализирани са присъщите за този метод слабости, свързани с определянето на точна локация и ориентационни ъгли на мобилната устройство, използвано за системата на AR. Избран е базов математически модел на сензорна подсистема тип IMU, вградена в мобилното устройство. Направен е анализ на източниците на грешки в показанията. Предложено е прилагане на цифрови филтри с цел повишаване на достоверността на сензорните показания. Представен е математически апарат на действието на комплементарен цифров филтър и филтър на Калман. Предложен е оригинален алгоритъм за безмаркерна идентификация на полеви обект от интерес, имащ своя електронен образ в съществуващото електронно бойно поле.

Предложен е алгоритъм за оценка на ефективността на AR в полеви условия. Проведен е софтуерен експеримент и са установени пределните дистанции, на които е възможна безмаркерна идентификация на обекти от бойния ред, както и на инженерно-строителни обекти, с пример поставено минно-взривно заграждение. Доказана е работоспособността на предложения модел за разширено представяне на обекти от електронно бойно поле с прилагане на добавена реалност в обхвата на изпълнение на тактически задачи.

Списък на приносите в дисертационния труд

Научно-приложни приноси

1. Дефинирани са общите принципи на изграждане на приложения с добавена реалност в процеса на обработка на информацията.

2. Извършен е анализ на проблемни моменти от функционирането на компютърни приложения за добавена реалност, ориентирани за прилагане във военната сфера. Определен е основен проблем, свързан с идентификацията на обект от интерес в зрителното поле на оператор. Предложен е модел на разширено електронно бойно поле.

3. Анализирани са методи за обмен и съхранение на данни в армейски системи за командване и управление. Създадени са алгоритми за достъп до бази от данни в централизиран и локален вариант.

4. Представен е формален модел на вградена сензорна подсистема за инерциална навигация. Извършен е анализ на източниците на грешки при обработка на сензорните данни. Приложени са методи за цифрово филтриране с цел повишаване на достоверността при работа на сензорната подсистема.

5. Създадена е архитектура на софтуерно приложение, насочено към прилагане на добавена реалност. Разработен е алгоритъм за безмаркерна идентификация на обект от електронното бойно поле. Проведен е анализ за ефективността на алгоритъма, приложен към различни типове от обекти от състава на електронното бойно поле в полеви условия.

Приложни приноси

1. Извършени са експерименти по извличане на данни от СУБД на армейски системи за командване и управление за целите на последваща визуализация в системи за добавена реалност.

2. Определени са числови стойности за дистанцията, на която възможностите на вградената сензорна подсистема позволяват прилагане на технологията на добавена реалност спрямо различни обекти от бойния ред в полеви условия.

Списък на свързаните с дисертационния труд публикации:

1. Колев А., Павлова Л., Военни приложения с добавена реалност, СЮ ICT Media vol.7, година XV, ISSN 1312-5605, София 2020, стр. 93-95, 2020

2. Павлова Л., Визуализация на електронно бойно поле, сп. СЮ, брой 3, година XVII, София, април 2021, стр. 94-95, ISSN 1312-5605

3. Alexander Kolev, Lili Pavlova, Augmented Reality in an Enhanced Command and Control Application, Information & Security: An International Journal 50, no. 2 (2021): 180-192. <https://doi.org/10.11610/isij.50223>

4. Павлова Л., Инженерни заграждения на местността и електронно бойно поле, ARTDEF 2023, София, стр. II-97 – II-104, ISSN 2815-2581

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Кр., Христозов И., Енчев Д. и др., Автоматизирана система за управление на човешките ресурси в Министерството на отбраната, под. 48900, София, 2000
2. Добавена реалност (Augmented Reality) – същност и приложение, <http://sci-gems.math.bas.bg/jspui/bitstream/10525/1804/1/adis-may-2012-090p-099p.pdf>, accessed 11 feb 2022
3. Добавена реалност, <https://innovatoria.com/bg/dobavena-realnost/>, accessed 25 dec 2022
4. Доктрина на ВС на Република България, https://www.mod.bg/bg/doc/strategicheski/20171211_Doktrina_VS.pdf, accessed 17 june 2023
5. Иванов И., Колев А., Покритие на клетъчна мрежа TETRA през погледа на добавена реалност, Шеста международна научна конференция Хемус 2012, Пловдив 2012

6. Йорданов К. , Управление на страната в кризи, СЮ - бр. 5, 2004
7. Каква е разликата между добавената реалност и виртуалната реалност, <https://digital.bg/каква-е-разликата-между-добавената-ре/>, accessed 15 dec 2022
8. Какво е обогатена реалност, <https://arweda.weebly.com/10531072109510801085-10851072-108010791086108310791074107210851077.html> accessed 7 jan 2022
9. Кампании с добавена реалност, <https://blog.a1.bg/2017/06/22/3-ar-advertising-campaigns>, accessed 16 nov 2022
10. Колев А., Павлова Л., Военни приложения с добавена реалност, СЮ ICT Media vol.7, година XV, ISSN 1312-5605, София 2020, стр. 93-95, 2020
11. Концепция за въздушно наблюдение и разузнаване с безпилотни летателни системи от Въоръжените сили на Република България, https://www.mod.bg/bg/doc/drugi/20120607_Koncepcia_vazdushno_nabljudenie.pdf, accessed 17 april 2023
12. Милена Х. Ламбева, Иван С. Христозов, Александър А. Колев, Структура на програмен шлюз за интегриране на различни информационни системи за командване и управление, Научна конференция, годишник: Факултет „Командно-щабен“. София: Военна академия „Г. С. Раковски“, 2011, ISSN 1312-2991, стр. 43-51
13. Митев Д., ИТ и системата за командване и управление, СЮMedia 20 юли, https://cio.bg/digitalizacia/2015/07/20/3438520_it_i_sistemata_za_komandvane_i_upravlenie, accessed 12 may 2020
14. Образование с добавена реалност, https://www.actualno.com/umnomlado/da-pipnem-obrazovanieto-s-dobavena-realnost-news_1463484.html, accessed 15 oct 2022
15. П. Атанасов, <http://sim-on.org/downloads/interactive.pdf> , Музеят – нови медийни и информационни технологии, accessed 18 dec 2022
16. П. Атанасов, Създаване на интегрирана информационна система по история, археология и етнология, <https://www.academia.edu/76300340/> , accessed 27 jan 2023
17. Павлова Л., Визуализация на електронно бойно поле, сп. СЮ, брой 3, година XVII, София, април 2021, стр. 94-95, ISSN 1312-5605
18. Павлова Л., Инженерни заграждения на местността и електронно бойно поле, Международна научна конференция ARTDef 23, София 2023
19. Павлова Л., Колев А., Обмен на информация при военно приложение с добавена реалност, Международна научна конференция Хемус 2022, Пловдив 2022, под печат
20. Пенчева А., Митев Х., Добавена реалност (Augmented Reality) – същност и приложение, V-та Национална конференция „Образованието в информационното общество“, Пловдив, 2012 г., ISSN 1314-0752, стр. 90-99
21. С. Балабанов, Р. Илиев, Информационните способности – важен елемент на интелигентната отбрана, http://www.atlantic-bg.org/files/aora_mod_akis_conf_programme_30_31_jan_2012_files/talks/20120131_Atlantik_balabano_v_iliev_poster.pdf, accessed 20 feb 2021
22. С. Миланов, Извличане на зависимости в потоци от данни, https://www.uni-sofia.bg/index.php/bul/content/download/174299/1220519/version/1/file/Avtoferat_S.Milanov.pdf, accessed 17 jan 2023
23. Система ПИКИС. Проектиране на системата (C&C-FICIS (Cod. 149-6731/00E-Rel. 1.0), 2001
24. Система ПИКИС. Проектиране на системата (4ie-tt000047-e, rev.C), Октомври 2001 г., стр. 60-72
25. Системи за виртуална и усилена реалност и приложението им в геопространствените науки, <https://www.geomedia.bg/geodesia/sistemi-za-virtualna-i-usilena-realnost-i-prilozhenieto-im-v-geoprostranstvenite-nauki/>, accessed 15 may 2023
26. Софтуерна архитектура, https://www.wikiwand.com/bg/Софтуерна_архитектура, accessed 19 nov 2022
27. Стоименов В., Михов Д, Христозов И. и др., Комплекс “Труд и работна заплата” Описание. Общосистемна част, под. 48900, 2001
28. Христозов И. С., Върбанов Д. И., Темелков А., Енчев Д. и др., Автоматизирана информационна система на Ръководния състав на Българската армия - описание на системата. Общосистемна част, под. 48900, София, 2000
29. A. Mitaritonna Alejandro, M. J. Abásolo. Improving Situational Awareness in Military Operations using Augmented Reality. 23rd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Pilsen, Czech Republic, 2015
30. AdatP-3 NATO Message Text Formatting System, Jul 1, 2006
31. Alejandro Mitaritonna, Maria Jose Abasolo, Francisco Montero, An Augmented Reality-based Software Architecture to Support Military Situational Awareness, Proc. of the 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE) 14-15 April 2020, Istanbul, Turkey DOI: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179187

32. Alexander Kolev, Lili Pavlova, Application of Augmented Reality to Expand the Capabilities of Command and Control Systems, Springer Series Communication&Computing, 2022, в редакция
33. Alvaro Lopez Revuelta, Orientation estimation and movement recognition using low cost sensors, Department of Applied Signal Processing Blekinge Institute of Technology, SE-371 79, Karlskrona, Sweden, 2017
34. Android Programming 3D Graphics with OpenGL ES, https://www3.ntu.edu.sg/home/ehchua/programming/android/Android_3D.html, accessed 08 april 2023
35. Appshaker UVPH, <http://uvph.com/appshaker/>, accessed 16 feb 2022
36. ArcGIS REST Services Directory, <http://sampleserver6.arcgisonline.com/arcgis/rest/services>, accessed 11 sept 2022
37. ArcGIS Serviced Directory, <http://sampleserver4.arcgisonline.com>, accessed jan 2021
38. Army Tactical Command and Control Interoperability Specifications (ATCCIS), Working Papers 14-X series (2000)
39. Augmented reality catalogue, IKEA launches augmented reality catalogue, <https://www.dezeen.com/2013/08/05/ikea-launches-augmented-reality-catalogue/>, accessed 6 dec 2022
40. Convergence Design Lab, <https://engineering.purdue.edu/cdesign/wp/>, accessed 3 dec 2022
41. D.P.V.J. Jayakody & K.P.G.C. Sucharithrathna, Control Unit for a Two-Wheel Self-Balancing Robot, Global Journal of Researches in Engineering: JGeneral Engineering Volume 19 Issue 1 Version 1.0 Year 2019 Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Online ISSN:2249-4596& Print ISSN: 0975-5861
42. Danish Army Command and Control Information System (DACCIS), www.army-technology.com/contractors/data_management/saab-system2/, accessed 16 april 2023
43. Defense Advanced Research Projects Agency, <https://www.darpa.mil/>, accessed 22 feb 2023
44. Department Of Defense Interface Standard Connectionless Data Transfer Application Layer Standard MIL-STD-2045-47001D, sept. 2005
45. Dimov D., Kolev A., Augmented Reality as a Method for Expanded Presentation of Objects of Digitized Heritage, Serdica Journal of Computing 8 (4), 355–362, 2014
46. Endsley, M. R. A taxonomy of situation awareness errors, human factors in aviation operations. In R. Fuller, N. Johnston, and N. McDonald (Eds.), Human Factors in Aviation Operations, 1995, pp.287-292
47. Endsley, M. R. Design and evaluation for situation awareness enhancement. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 1988, 32(2), pp. 97-101
48. EvolveAR, <https://www.evolvear.io/augmented-reality-blog/ar-in-print-bridging-the-gap-between-the-digital-and-the-physical/>, accessed 04 may 2023
49. Family of Scatterable Mines - FASCAM, Military analysis network, <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/fascam.htm>, accessed 10 may 2023
50. FSensor, <https://github.com/KalebKE/FSensor>, accessed 28 jan 2023
51. Gans E, Roberts D, Bennett M, Towles H, Menozzi A and Cook J 2015 Augmented reality technology for day/night situational awareness for the dismounted Soldier Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IX, and Head- and Helmet-Mounted Displays XX, 947004 (21 May 2015)
52. Historical Magnetic Declination, https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical_declination/, accessed jan 2021.
53. Iliev R., Sensors and Sensor Systems in Defense, CIO ICT Media vol.7, year XV, ISSN 1312-5605, Sofia 2019, pp 80-84 in Bulgarian language.
54. IVAS Production Contract Award, <https://www.peosoldier.army.mil/News/Article-Display/Article/2556870/ivas-production-contract-award/>, accessed may 2021
55. J. Timonen y J. Vankka, Enhancing Situational Awareness by Means of Information Integration of Sensor Networks and Visualization, S. 8756, Ed., Baltimore, Maryland, USA: SPIE 8756, 2013, DOI: 10.1117/12.2017686
56. Janeras, M.; Roca, J.; Gili, J.A.; Pedraza, O.; Magnusson, G.; Núñez-Andrés, M.A.; Franklin, K. Using Mixed Reality for the Visualization and Dissemination of Complex 3D Models in Geosciences— Application to the Montserrat Massif (Spain). Geosciences 2022, 12, 370. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100370>
57. Janes, <http://www.janes.com/articles/Janes-C4I-Systems/SICF-Force-Command-Information-System-France.html>, accessed 15 march 2023
58. Joint Command, Control, Consultation, Information Exchange Data Model (JC3IEDM), Stanag 5525, 2010
59. Joint Conflict And Tactical Simulations 8. 0. Manuals, 2008
60. Kalman filter, https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter, accessed 12 jan 2024
61. Kriswiner / MPU9250, <https://github.com/kriswiner/MPU9250>, accessed 6 march 2023
62. Kriti Kumar and all, An Improved Tracking Using IMU and Vision Fusion for Mobile Augmented Reality Applications, The International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA) Vol.6, No.5, October 2014 DOI : 10.5121/ijma.2014.6502
63. Land Command&Control Information Exchange Data Model, Edition 2.0, 31 March 2000

64. Line-Plane Intersection, <http://mathworld.wolfram.com/Line-PlaneIntersection.html>, accessed 6 nov 2014
65. Long Chen, Wei Wang, Jue Qu, Songgui Lei and Taojin Li, A Command and Control System for Air Defense Forces with Augmented Reality and Multimodal Interaction, *Journal of Physics: Conference Series* 1627 (2020) 012002, doi:10.1088/1742-6596/1627/1/012002
66. M270 Multiple Launch Rocket System, https://en.wikipedia.org/wiki/M270_Multiple_Launch_Rocket_System, accessed 27 feb 2021
67. Microsoft Azure: Cloud Computing Services, <https://azure.microsoft.com/en-us>, accessed 12 feb 2024
68. Microsoft Hololens 2, <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>, accessed april 2021
69. Military Targets and Tarfet Mechanisms Full-Scale Targets, <https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/17-12-7/ch10.htm>, accessed 12 jan 2023
70. Morozov M., Augmented Reality in Military: AR Can Enhance Warfare and Training, <https://www.jasoren.com/augmented-reality-military/>, accessed 21 dec 2023
71. Multilateral Interoperability Programme, <http://www.mip-site.org>, accessed 18 march 2023
72. Neil G. Siegel, Azad M. Madni, The Digital Battlefield: A Behind-the-Scenes Look from a System perspective, Conference on Systems Engineering research (CSER 2014), Redondo Beach, CA, March 21-22, 2014, doi:10.1016/j.procs.2014.03.095
73. Nitin J. Sanket, Complementary Filter for Attitude Estimation, <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/imu.html#cf>, accessed 12 jan 2024
74. Nitin J. Sanket, Kalman filter, <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/kf.html>, accessed 12 jan 2024
75. Nitin J. Sanket, Mathematical Model of an IMU, <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/imu.html>, accessed 25 nov 2022
76. Northrop Grumman Mission Systems, Command and Control Personal Computer, San Diego, CA92123, 2002
77. Northrop Grumman, Battle Command System v.2.0, Manassas, VA2019, July 2005
78. Northrop Grumman, <https://www.northropgrumman.com>, accessed 18 jan 2023
79. O.H. Madgwick, Sebastian An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, 30 april 2010
80. OpenCV for Android SDK, <https://opencv.org/releases/>, accessed 3 july 2023
81. OpenGL - The Industry's Foundation for High Performance Graphics, <https://www.opengl.org/>, accessed 06 april 2023
82. OpenGL Tutorial. An Introduction on OpenGL with 2D Graphics, https://www3.ntu.edu.sg/home/ehchua/programming/opengl/cg_introduction.html, accessed 08 april 2023
83. OpenSceneGraph, <https://www.opengl.org/sdk/libs/OpenSceneGraph/>, accessed 03 april 2021
84. Overview of the C2 Information Exchange Data Model, Edition 6.1, http://www.e-mapsys.com/C2IEDM-MIP_Overview, accessed 20 nov 2003
85. Panwar R. S., Network centric warfare: understanding the concept, Futule Wars "Technology, specialization, transformation", <https://futurewars.rspanwar.net/network-centric-warfare-understanding-the-concept/>, accessed may 2023
86. Philip Yanni, A VMF / Link-16 / Simulation Gateway;Addressing the complexity of datalink interoperability.ANZUS Inc.9747 Business Park AveSan Diego, CA 92131
87. Real-time situational awareness, <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/land/command-and-control-personal-computer-c2pc/>, accessed 25 feb 2021
88. Rekimoto, Jun. Nagao, Katashi. The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments, DOI: 10.1145/215585.215639
89. Ronald T. Azuma, A Survey of Augmented Reality, Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (August 1997), 355-385, <https://www.cs.unc.edu/~azuma/ARpresence.pdf>
90. S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2011, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICORR.2011.5975346
91. Search Engine for 3D printable Models, <https://www.yeggi.com/>, accessed 24 feb 2023
92. Sensor fusion demo for Android, <https://github.com/apacha/sensor-fusion-demo/tree/main>, accessed 17 jan 2023
93. Shi J., C. Tomasi. Good features to track. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94), 1994, 593–600
94. SRTM Data Download Manager, <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>, accessed 12 may 2023
95. STANAG 5048 - The Minimum Scale of Connectivity for Communications and Information Systems for NATO Land Forces, 2017
96. StarUML, <https://staruml.io/>, accessed jan 2021.
97. StL Binary Format, https://www.fabbers.com/tech/STL_Format, accessed 19 jan 2024

98. Susana Ruano, Carlos Cuevas, Guillermo Gallego and Narciso García, Augmented Reality Tool for the Situational Awareness Improvement of UAV Operators, Sensors 2017, 17, 297; doi:10.3390/s17020297
99. Tactics, Techniques and Procedures for Field Artillery Manual Cannon Gunnery, US Marine Corps, p. 527, 2016
100. The Ada Platform, <https://appsource.microsoft.com/en-us/product/web-apps/bgcengineeringinc.ada-platform>, accessed 15 feb 2024
101. The Army's next-generation headset, <https://taskandpurpose.com/news/army-integrated-visual-augmentation-system-soldier-touchpoint/>, accessed may 2021
102. The OpenSceneGraph Project Website, <https://www.openscenegraph.com/>, accessed 01 april 2023
103. Tolk A., Diallo S., Turnitsa Ch., The Command and Control Information Exchange Data Model (C2IEDM) as a Modeling & Simulation (M&S) Standard, International Training Exhibition and Conference (ITEC), January 2006, https://www.researchgate.net/publication/302132562_The_Command_and_Control_Information_Exchange_Data_Model_C2IEDM_as_a_Modeling_Simulation_MS_Standard, assessed jan 15, 2021
104. Torch-X Mounted, <https://elbitsystems.com/media/TORCH-X-Mounted.pdf>, accessed 25 jan 2024
105. Ultimaker Thingiverse, <https://www.thingiverse.com/>, accessed 22 march 2024
106. UML, <http://uml.org/>, accessed jan 2021
107. Unity Real-Time Development Platform, <https://unity.com/>, accessed 01 feb 2023
108. User's Manual (UM) for Command and Control PC (C2PC) Version 6.1.1 for Windows 2000/Windows XP, aug. 2005
109. Virtual Reality For The Mining Industry - Lucara Diamond, <https://www.linkedin.com/pulse/virtual-reality-mining-industry-dan-audet>, accessed 12 oct. 2022
110. Wagner D., D. Schmalstieg. ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices. In: Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop, St.Lambrecht, Austria, Graz Technical University, 2007, 1–8
111. What We Can Expect From VR In The Future, <https://www.consolatopalato.org/tag/future/>, accessed 16 nov 2022