



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ**

Мирослав Василев Шиндаров

**АЛГОРИТЪМ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ ПО МЕТОДА НА
МРАВКИТЕ ЗА ПОСТРОЯВАНЕ НА БЕЗЖИЧНИ
СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

по специалност 01.01.12 „Информатика“

в професионално направление 4.6 „Информатика и компютърни науки“

Научен ръководител: доц. Стефка Фиданова

София, 2014 г.

Съдържание

Съдържание	1
Списък на фигурите	3
Списък на таблиците	4
Увод	5
Глава 1. Безжични сензорни мрежи	11
1.1 Сензор	11
1.1.1 Общо устройство на безжичните сензори	11
1.1.2 Начин на работа на сензорен възел в безжична сензорна мрежа	12
1.2 Области на приложение на безжичните сензорни мрежи.....	13
1.3 Топология при безжични сензорни мрежи.....	20
1.3.1 Топология на мрежи тип „звезда”	21
1.3.2 Топология на мрежи тип „око”	22
1.3.3 Топология на мрежи от хибриден тип.....	24
1.4 Някои актуални комуникационни стандарти за WSN.....	26
1.5 Изисквания към безжичните сензорни мрежи	30
Глава 2. Метод на мравките за комбинаторна оптимизация	32
2.1 Мравките в природата	32
2.1.1 Класификация на видовете	33
2.1.2 Морфологично описание	34
2.1.3 Многообразие	35
2.1.4 Взаимоотношения между представителите в колонията.....	36
2.2 Комбинаторна оптимизация по метода на мравките.....	40
2.2.1 Представяне на алгоритъма	44
2.2.2 Варианти на основния алгоритъм.....	49
2.2.3 Сходимост.....	51
2.2.4 Някои приложения на алгоритъма на мравките.....	51
Глава 3. Постановка на задачата	53
3.1. Комбинаторна оптимизация и техники за решаване на този клас задачи.....	53
3.2 Точни и Приблизени алгоритми	54
3.3 Проучвания относно проблема с позиционирането на сензорите в БСМ.....	57
3.4 Описание на задачата за изграждане на безжична сензорна мрежа	58
3.5 Най-добри резултати в литературата за разглежданата задача	62

Глава 4. Едноцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки, за построяване на безжична сензорна мрежа	66
Глава 5. Едноцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки, с въвеждане на теглови коефициенти, за построяване на безжична сензорна мрежа	75
Глава 6. Многоцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки за построяване на безжична сензорна мрежа	78
Заклучение и обобщение на резултатите от изследването	84
Списък на публикациите, свързани с дисертацията	85
Апробация на резултатите	85
Приноси	86
Декларация за оригиналност	87
Цитирана литература	88
Приложение	94

Списък на фигурите:

Общо 26 фигури, от които 6 фотографски изображения и 7 графични схеми.

Фигура 1. Безжични сензори – 13

Фигура 2. Сензори в лозарството – 17

Фигура 3. SensTG Agro – 17

Фигура 4. Сензори в селското стопанство – 18

Фигура 5. Програмируеми сензори, поддържащи Операционна система TinyOS – 19

Фигура 6 Безжична сензорна мрежа за изследване на вулкани – 20

Фигура 7. Мрежа тип звезда – 21

Фигура 8. Мрежа тип Mesh Network – 23

Фигура 9. Мрежа от хибриден тип – 25

Фигура 10. Безжична сензорна мрежа в градски условия – 29

Фигура 11. Мравките в природата – 33

Фигура 12. Вид мравка работничка – 34

Фигура 13. Двоен мост с еднакви по дължина разклонения – 41

Фигура 14. Двоен мост с различни по дължина разклонения – 43

Фигура 15. Движение на мравките – 45

Фигура 16. Задача за търговския пътник – 52

Фигура 17 Разпределение на сензорните възли на случаен принцип – 61

Фигура 18. Решения, постигнати с МОЕА – 65

Фигура 19. АСО Pareto фронт и МОЕА Pareto фронт – 82

Фигура 20. Решение, постигнато с АСО – 83

Фигура 21. Област с две препятствия – 96

Фигура 22. П - образна област – 97

Фигура 23. S - образна област – 97

Фигура 24. Г - образна област – 98

Фигура 25. О - образна област – 98

Фигура 26. Изобразяване на препятствие с кръгла форма – 99

Списък на таблиците:

Таблица 1 Използвани параметри при MOEA, NSGA II и IBEA - 64

Таблица 2 Параметри на тестовия пример – 71

Таблица 3. Параметри на алгоритъма – 72

Таблица 4 Сравнение на едноцелевия вариант с други алгоритми – 73

Таблица 5. Сравнение между два ACO алгоритъма – 74

Таблица 6. Недоминирани решения – 76

Таблица 7. Решения за безжична сензорна мрежа – 76

Таблица 8. Параметри на многоцелевия алгоритъм – 80

Таблица 9 Сравнение на резултатите от различни алгоритми - 81

Таблица 10 Сравнение на хиперобема - 82

Увод

Настоящата глава цели да въведе читателя в предметната област и част от терминологията на дисертационния труд. Друга част от термините са въведени в съответните глави, където са дефинирани. В хода на изследването са разгледани функционалните особености и някои известни приложения на безжичните сензорни мрежи. Изведени са основните проблеми при тези системи и е представено тяхното моделиране в компютърно пространство. Последователно са дадени описание на техниката, която сме избрали да приложим за решаване на проблема и заедно с това са представени конструкциите на три самостоятелни оригинални варианта на използваната от нас метаевристична техника в отделни глави на тази дисертация. Получените резултати са сравнени с най-доброто в литературата до този момент.

Безжичните Сензорни Мрежи (БСМ) са телекомуникационни системи, които придобиват широка популярност, следвайки динамиката на развитие в микро електрониката и съпътстващото програмно осигуряване. В допълнение към това можем да посочим и трайно намаляващата пазарна цена за единични сензори при безжичните сензорни мрежи и производството на батерии с по-дълъг живот. Като основен фактор, който прави безжичните сензорни мрежи атрактивни за бизнеса и индустрията можем да посочим естественото им предимство да събират и предават информация за обект или област от пространството, в която човешкият фактор е сведен до минимум или напълно невъзможен, при това за достатъчно дълго време на наблюдение. Според прогнози на анализатори като АйДиТехЕкс от 1999 г. IDTechEx предоставя независими пазарни изследвания и бизнесразузнаване в сферата на високите технологии [публикувано на сайта на IDTechEx], нарастването на броя на инсталираните в глобален план БСМ – през 2009 г. възлиза на около 10 000, с очаквания за 87 500 през 2019 и към 100 000 през 2029 година. Съвсем очаквано за този вид системи е: да бъдат надеждни; да могат лесно да се разширяват, като в същото време осигуряват пълно сензорно покритие и свързаност по енергийно ефективен начин; да бъдат лесни за управление и интегриране. Постигането на тези изисквания на практика се явява нелека задача пред производителите на сензори и програмното осигуряване за тях, а в редица случаи изправя потребителя пред широк избор на компоненти от една нова технология, която съчетава в себе си класически средства за пренос на данни по безжичен път, и от

устройства, които са проектирани и създадени с цел наблюдение и засичане на отклоненията в състоянието на конкретен обект или величина в пространството.

В същото време едно от ограниченията за още по-широкото навлизане на безжичната сензорна технология в някои области е нивото на консумацията на енергия и ограниченията на батериите. Независимо от въведените подобрения при производството на батерии, сензорите продължават да се нуждаят от презареждане или смяна на батериите. Това е сериозен проблем в труднодостъпните и отдалечени райони, както и за пространства, на които са инсталирани голям брой сензори.

Производителите се опитват да разрешат този проблем, като конструират сензори, използващи енергията на естествените източници – вибрации от клатещи се мостове, работещи машини, дори стъпките на пешеходци. Така животът на батериите би могъл да се увеличи. БСМ трябва да са енергийно ефективни и да консумират малко енергия при работа. Това води до по-дълъг експлоатационен срок на мрежата като цяло. От казаното дотук бихме могли да обобщим, че има известна вероятност прогнозите за ръст в прилагането на БСМ да се окажат верни, дори и с риск от пазарно спекулиране. Въпреки очаквания ръст в прилагането на БСМ, едва ли можем да кажем, че със сходна динамика се развива и индустрията за производство на електрозахранващи източници (батерии) за сензорите в БСМ. Въпреки напредъка в миниатюризацията при сензорите и при батериите за тях, все още батериите имат граница на заряда (в зависимост от консумацията рано или късно престават да работят). Това предполага пред БСМ един фундаментален проблем - проблема за енергията в БСМ, а оттук и живота на мрежата.

Ако прогнозите за ръст в приложението на БСМ са дори отчасти верни, то можем да предполагаме, че въпросът за справяне с проблема с енергията вероятно ще стои пред всички настоящи и бъдещи ползватели на БСМ в близко бъдеще. Мотивирани от това, вярваме, че проблемът за построяване на БСМ има своята актуалност и всеки опит той да бъде решен с ефективен метод би донесъл полза както за потребителите, така и за изследователите в областта.

В разглежданата от нас задача пространството което един самостоятелен сензор може да наблюдава, е моделирано под формата на кръг, чийто радиус R_{sens} или радиусът на наблюдение е обхват на самия сензор. По аналогичен начин R_{com} е комуникационният радиус на предавателя на сензора и се моделира отново под формата на кръг. Това е обхватът на радиовръзката, в който е възможно установяване на комуникационна свързаност и предаване на данни. Стойностите на тези параметри зависят от средата, радиопредавателите, различните модели сензори и други.

Пространството за наблюдение в една БСМ представлява обединение на зоните за наблюдение на всеки самостоятелен сензор, свързан към мрежата.

За да можем да пресметнем енергията на БСМ, трябва да пресметнем броя на трансмисиите, които всеки сензор инициира. Безжичните сензорни мрежи работят циклично. В един цикъл всеки сензор засича данните в своето поле и ги предава към специален възел, наречен Високо енергиен комуникационен възел (ВЕКВ). В разглежданата от нас задача всеки сензор изпраща информацията под формата на пакети (съобщения) към тези свои съседи, които са най-близко до ВЕКВ или до самия ВЕКВ, ако той е в директен обхват. Ако няколко съседни сензора са с най-кратък път до ВЕКВ, то изпращаните съобщения се разпределят между тях. Следователно, ако даден сензорен възел има n съседи с най-близко разстояние до ВЕКВ, всеки от тях получава $1/n$ от съобщенията на въпросния сензор. Съобщението, съдържащо информацията, събрана от сензора, се смята за единица. Всеки сензорен възел консумира енергия, за да изпрати едно съобщение. Към това съобщение прибавяме и сума на пристигналите съобщения от сензорите, които са на по-голямо отстояние от ВЕКВ.

В разглежданата от нас задача се изисква пълно покритие на изследваната област. От друга страна, броят на сензорите трябва да бъде възможно най-нисък, тъй като повече сензори би означавало по-висока крайна цена при изграждане и поддръжка на мрежата, възможно е и по-високо влияние на околната среда

Задачата за изграждане на БСМ мрежа, която разглеждаме, е двукритериална оптимизационна задача. Търси се мрежа, състояща се от минимален брой сензори и разходваща минимум енергия. Ограниченията на задачата са пълно покритие на наблюдаваната област и свързаност на мрежата.

Идеята за алгоритъма на мравките е вдъхновена от наблюденията на това как мравките усвояват източници на храна, и по-специално от наблюдението, че индивидуално ограничените откъм когнитивни възможности мравки, взети заедно, откриват най-кратък път между източника на храната и своя мравуняк. В математиката това е особено полезно при задачи, които могат да се сведат до намиране на най-кратък път в граф.

В природата тези изключителни насекоми (мравките) първоначално се движат по случаен начин и при откриване на източник на храна се завръщат към гнездото на колонията си, като по целия обратен път полагат следи от вещество, наречено феромон, което служи за комуникация с останалите мравки. Ако други мравки се натъкнат на

маршрута на първата мравка, те с голяма степен на вероятност престават да се движат по случаен начин, а поемат по оставената следа от феромон до източника на храна и в случай, че също открият храна, при връщането си полагат собствена следа от феромон върху вече съществуващата. По този начин количеството феромон се увеличава и маршрутът до източника на храна става още по-привлекателен за следващите мравки.

В настоящата дисертация предлагаме алгоритми за решаване на задачата, базирани на метода на мравките за дискретна оптимизация.

Цели и задачи

Основните цели пред докторанта са от научен, научно-приложен и приложен характер. Накратко те могат да се обобщят по следния начин:

Цели на дисертацията:

1. Да бъде изследвано поведението на метода на мравките като метаевристичен модел при решаване на задачата за построяване на БСМ, като задача от клас NP –трудни.
2. Да се изследва влиянието на конвертирането на целевите функции в една върху качеството на решенията, намерени от алгоритъма.
3. Да се изследва влиянието на многоцелевия вариант на алгоритъма на мравките върху качеството на намерените решения на задачата за БСМ.

За решаване на тези цели бяха формулирани следните задачи:

Задача 1. Разработване на едноцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки за построяване на БСМ.

Задача 2 Да се разработи вариант на алгоритъма с въвеждане в модела на теглови коефициент като инструмент за манипулация на целевата функция в едноцелевия вариант на алгоритъма за построяване на БСМ.

Задача 3. Разработване на многоцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки за построяване на БСМ и сравняване с едноцелевите варианти.

Задача 4. Да се направи програмна реализация на разработените алгоритми.

В глава 1 е дадено описание на устройството на безжичните сензори и областите на тяхното приложение. В глава 2 е описано поведението на мравките в природата и как то е дало идеята за създаването на метода на мравките. Дадено е и общо описание на метода. В глава 3 е дефинирана задачата за построяване на безжична сензорна мрежа.

Как моделираме задачата и как приложим алгоритъма? Отговорът на тези въпроси е представен последователно в глави 4, 5, и 6 на дисертацията, където представяме задачата под формата на граф, по чиито върхове мравките ще конструират решението. Според нас е подходящо графът, с който представяме нашата задача, да бъде правоъгълна решетка. Възлите на сензорната мрежа ще бъдат поставяни във възлите (върховете) на графа. Феромонът ще бъде поставян във възлите на графа. От своя страна, решението представлява път или дърво в граф. В нашия случай решението представлява дърво в графа, започващо от БЕКВ. След като началната стойност на феромона е зададена, мравките започват да изграждат валидни решения, стартирайки от случайно избран връх, от който съществува директна връзка до БЕКВ. След построяване на решението, отдалечените от БЕКВ сензори имат индиректна връзка с БЕКВ, осъществявана чрез по-близкостоящите сензори.

В дисертацията са разработени три алгоритъма, основани на метода на мравките. В първия двете целеви функции са обединени в една като нормирана сума. Във втория задачата отново е сведена до едноцелева като са въведени теглови коефициенти. В третия задачата се решава като многоцелева. Направено е сравнение на постигнатите резултати. Целта е да се намери кой е най-подходящият подход при решаване на задачата. Направено е и сравнение с резултатите, постигнати с използването на други евристични методи.

За да могат да бъдат тествани и прилагани разработените в дисертацията алгоритми, е разработен и тестван софтуер, който ги реализира. Целта на разработената програма е да постави сензори в зададена област, като осигури пълно покритие на областта. Позицията на възлите се избира така, че да минимизира разходваната енергия от всеки отделен възел, както и броя на възлите (сензорите). Това са противоположни цели, тъй като наличието на повече сензори води до разделяне на носената от тях ретрансмисия на по-малки дялове. За да се определи енергията, която се разходва при комуникация, се изчислява броят на ретрансмисиите, които извършва всеки възел. Възлите на мрежата са фиксирани и енергията за предаване на съобщение не зависи от разстоянието. Мрежата работи на серии. На всяка серия всеки възел събира данни от областта, която покрива, и ги изпраща към БЕКВ. Между сериите възлите са в ниско енергийно състояние. Всеки възел предава данни до неговите съседи, които са най-близо до БЕКВ или директно на БЕКВ, ако му е в комуникационния обхват. Ако няколко съседи се определят като най-близки до БЕКВ, то предаваните съобщения се поделят между тях. Така предаваните от един възел съобщения са равни на входящите

съобщения плюс собственото съобщение, а съобщенията, който предава на всеки от съседните възли, равно отстоящи от ВЕКВ, са равни на броя на съобщенията предавани от възела, разделен на броя на равно отстоящите съседи. Следващите стъпки са да моделираме ограниченията, пространството, да дефинираме елементите на алгоритъма и да създадем процедури, описващи движението на компютърните мравки (процедури на C++) върху моделираното пространство. Нашите компютърни мравки са програмирани да се движат в границите на пространството за наблюдение, като търсят подходящите координати за поставяне на сензорите. Целта ни е да открием такива координати от пространството, че ако поставим в тях сензори – да имаме пълно покритие и свързаност, като пълното покритие е постигнато с възможно най-малък брой сензори. Както ще представим по надолу в дисертацията, в практически условия решенията са повече от едно и затова ще оставим отворен изборът на администратора за това, какъв компромисен избор да направи. Ако цената за смяна на батериите е малка и те могат да се подменят лесно, то бихме могли да предпочетем някое от решенията с по-малко сензори, което да спести разходи за сензори. По аналогичен начин, ако избраните от администратора сензори не са скъпи, но батериите и тяхната честа смяна е скъп процес, то тогава отново може да се предпочете решение, което е с повече сензори, които да разпределят трафика, използвайки по-малко енергия.

Авторът изказва най-дълбока благодарност на своя научен ръководител доц. Стефка Фиданова, както и на доц. Пенчо Маринов за всестранната им подкрепа при изработване на настоящия дисертационен труд и за предоставената му възможност да работи в едно толкова актуално, модерно и перспективно направление, каквото е компютърното моделиране.

Авторът изказва и дълбока благодарност към целия научен колектив на Института по Информационни и комуникационни технологии и към неговия Директор за осигурените отлични условия за работа и обучение.

Глава 1

Безжични сензорни мрежи

1.1 Сензор

Сензорите са устройства които събират и изпращат данни. Видът на сензорите зависи от приложението им, като например: Електронен датчик, (за температура, за звук - микрофон с пиезокристал или друг вид сензор) който засича промени в наблюдаваната зона, радиопредавател, чрез който информацията за засечените промени се изпраща за последваща обработка.

Задължителен елемент е електрическото захранване. Когато става дума за БСМ, то е под формата на батерии от различен тип. Повечето съвременни модели имат собствена ЦПУ(от Central Processing Unit - CPU) памет и операционна система (ОС).

Като преносна среда в сензорните мрежи най-често се използват радиовълни, а понякога и светлинни вълни. Въпреки че радиовълните намират по-широко приложение, то при тях съществуват някои недостатъци като излъчване във всички посоки, което води до по-голям разход на енергия и повишава риска от подслушване на комуникацията. При използването на светлинни вълни възлите (сензорите) имат по-малки размери (нямат радиоантена), по-ниска консумация на енергия (линейна зависимост между разстояние и консумация на енергия при предаване на сигнала), по-висока сигурност (насочено предаване). Недостатъци при използването на светлинни вълни е нуждата от пряка видимост между отделните сензори и точно насочване на сигналите, което прави приложението на такива мрежи трудно. В резултат на това повечето производители предлагат модели на сензори, работещи с радиосигнал. В хода на дисертацията вземаме под внимание този вид сензори, когато моделираме мрежата и трябва да намерим оптималните им позиции в полето за наблюдение.

1.1.1 Общо устройство на безжичните сензори.

Използваните в мрежите безжични сензори представляват съвкупност от сензор или сензори за различни величини, управляващ блок (Microcontroller, MicroController Unit- MCU – процесор), памет и приемо-предавател (Transceiver) T/R. Цифровите

сигнали от изхода на аналогово цифровия преобразувател постъпват в MCU и той ги записва в паметта. Те се извличат от нея през определени интервали от време и чрез T/R се излъчват от антената. Част от паметта се използва за записване на цялата програма за работа на БСМ. Захранващият източник може бъде батерия или акумулатор.

За успешното свързване и по-продължителната експлоатация на мрежата е необходимо сензорите да имат ниска постояннотокова консумация. При някои безжични мрежови архитектури (топологии) безжичният сензор се включва периодично за кратко време, за да проведе измерването и запише данните в паметта, както и за предаване към ВЕКВ. През останалото време сензорът е в режим “Очакване” (Sleep Mode), където консумира нищожно количество ток. Необходимо е времето на включване при получаване на повикване (Immediacy) да не надхвърля няколко милисекунди (ms). Допълнителна информация за функционирането на сензорите, свързана с избора на конкретна топология е представена в раздел 1.3 (Топология при безжични сензорни мрежи по долу в Глава 1.)

1.1.2 Начин на работа на сензорен възел в БСМ.

Безжичните сензорни мрежи привличат интереса на специалистите с големия брой теоретични и практически предизвикателства, свързани с приложението и възможностите на този вид мрежи. Безжичната архитектура позволява лесно измерване на физични величини като температура, концентрация, влажност, налягане и други параметри, поддаващи се на електронно измерване, на труднодостъпни терени, или където директно наблюдение е трудно или невъзможно да бъде постигнато с пряко участие на човешки фактор.

Съществуват два основни начина на работа на безжичните сензори:

- Първият е периодичното измерване (Periodic Sampling), което се прави през определени интервали от време, например контролиране на температурата или налягането в технологичен процес. Интервалите могат да са в твърде широки граници и дори да се променят по време на процеса. Поради това в съвременните безжични сензори е възможно програмирането им по радиоканал.
- Вторият начин се нарича прагово измерване (Event-Driven) и се извършва само когато контролираната величина премине определена стойност. Типични примери са безжичните сензори в алармени системи.



Фигура 1. Безжични сензори

Източник на снимката от Фиг. 1.: <https://www.nics.uma.es/research/wsn> - 2013г.

1.2 Области на приложение

БСМ имат широка област на приложение. Така например безжични сензори се използват за измерване на температурата и вибрациите на определени части от машини, както и за наблюдение на нивото на смазочните течности в двигатели. По аналогичен начин се осъществява контрол и наблюдение на работната температура при електродвигатели на машини и на генератори или турбини в електроцентрали, както и на корозирание на повърхности и на износване на елементи в лагери.

Сензори се използват при производства с краен продукт течности, съхранявани в резервоари на голяма площ (например нефтени рафинерии и химически заводи), поради по-сигурното и по-евтиното използване на безжични сензорни мрежи вместо кабелно свързани мрежи.

Други области на приложение обхващат: контрол на количеството на опасните газове и други биологични и химически вещества във въздуха на затворени помещения; контрол на температурата на замразени продукти в хладилни помещения и при транспортиране с превозни средства и др. Проектът SMART DUST [SMART DUST 2014] на института в Бъркли (САЩ) доби широка популярност покрай революционните си идеи в развитието и минимизацията на безжичните сензори, като очакваните размери са в рамките на един кубичен милиметър, като сензорите работят с малка консумация на енергия. Подобни проекти създават основано очакване за разширяване

на спектъра от практически приложения на безжичните сензорни мрежи в съвсем близко бъдеще.

По-долу са дадени няколко примера за приложения на безжичните сензорни мрежи в различни области на живота.

Според някои електронни издания у нас, проследяващи развитието на информационните технологии [Инженеринг ревю 2013], развитието на технологиите за кодиране и пренос на информация (данни), както и поевтиняването на голяма част от устройствата за съхранение на данни се отразява на развитието на безжичните мултимедийни сензорни мрежи. Те позволяват едновременното предаване на данни в аудио и видеоформат и данни от сензори. Това се постига в резултат на някои подобрения и миниатюризация на хардуера, благодарение на които единичен сензор може да бъде асемблиран с модули за засичане на видео и звук и(или) друга величина. Освен получаването на мултимедийна информация, безжичните мултимедийни сензорни мрежи могат също така и да я съхраняват и обработват в реално време. Мултимедийните данни като аудио-видеозапис на даден обект, заедно с информация за измервания на температура или налягане в критични точки, могат да бъдат използвани в сферата на сигурността, при наблюдение на индустриален процес и при вземането на решения.

В някои системи за контрол в електрониката се използват алгоритми за разпознаване на образи, получени от безжични мултимедийни сензорни мрежи, това помага за по-доброто качеството при производство на полупроводникови елементи, чипове, модули, хранителни, фармацевтични, химични продукти или за да се разбере позицията и ориентацията на различни части, за обработката на които се използва роботизиран процес. В значителна степен коментарите в българските специализирани електронни издания се припокриват и с анализите на специализирани международни електронни издания, посветени на безжичните сензорни мрежи.

Известно е, че безжичните сензорни мрежи водят началото си от военната индустрия, след което постепенно се разширява гражданското им приложение. Първоначално са използвани за наблюдение и засичане на цели, както и за системи за прихващане. Приложения на БСМ с цел наблюдение и разузнаване са описани и в [Deb 2002].

Можем да илюстрираме такъв пример с БСМ на американския военен доставчик Lockheed Martin:

Self Powered Adhoc Networks (SPAN)

Ultra-Low Power, Remote Unattended, Ground Sensing Surveillance System 2011-09-0037-1-SPAN или нискоенергийна, отдалечено независима система за наблюдение чрез гео-акустични сензори. Както производителите описват, постоянното наблюдение и откриване на проникване може да се окаже обезсърчително предизвикателство за военните и силите за сигурност. Независимо дали мисията е разгърната в близост до оперативна командна база или се налага наблюдение на отдалечен критичен обект или за граничен контрол, решението представлява цялостна система за ситуационна осведоменост.

Описание на Lockheed Martin SPAN.

SPAN предлага незабележимо микронаблюдение и докладване на засечените изменения, като системата е проектирана за откриване и характеризиране на обекти. SPAN използва BCM със специализирана микроелектроника, разпределена обработка на сигнали, ниска мощност, събиране на енергия (батериите на сензорите се презареждат от вградени слънчеви клетки или чрез вибрации от околната среда) в единна - интегрирана система за устойчиво наблюдение, възможност за защитата на силите, откриване на непозволено проникване и наблюдение на гранични зони.

BCM функционира с вградени микросензори и технология на обработка, оптимизирана за потребители, които изискват бързо внедряване на решения с ниска цена, надеждно и устойчиво наблюдение. Използват се сензорни възли с размерите на човешка длан, които улесняват прикриването и разполагането им за нуждите на прикрити операции по наблюдение.

Батериите на сензорите се захранват от тънки соларни колектори. Това на практика води до по-дълга експлоатация без смяна на батерии. Тази сензорна мрежа може да бъде пренасяна и разгърната от един човек. Ниската цена позволява системата да бъде предпочитана за различни специализирани операции.

SPAN притежава следните характеристики:

- интуитивен интерфейс - позволява бързо внедряване и лекота на работа
- SPAN използва енергията, за максимален експлоатационен срок
- Малки и леки, сензорните възли могат да бъдат монтирани в скален камуфлаж, като по този начин е по-трудно да се компрометират (да бъдат разкрити и неутрализирани)
- Множество комуникации, включително съоръжения за пренос на данните към сателит.

SATCOM разполага със следните функционални възможности:

- Акустично и сеизмично проучване
- Ниска консумация на енергия
- Сензорните възли автоматично си сътрудничат, за да се създаде мрежа
- Характеризиране на събития
- Обработката на данните в самия сензорен възел намалява фалшивите сигнали и аларми (сензорните възли притежават собствен процесор и програмен интерфейс)

Възможности за конфигуриране според вида на батериите:

- Продължителна енергийна мощност - включва окомплектоване на сензорните възли и ВЕКВ с батерии, които събират енергия от околната среда
- Стандартна енергийна мощност: включва окомплектоването на сензорните възли и ВЕКВ със сменяеми батерии.

Друг сектор, в който безжичните сензорни мрежи се използват, е селското стопанство. Основните практически приложения на системите за агро безжично наблюдение могат да включват наблюдение на обработваеми площи, животни, резервати, оранжерии. Възможно е да се анализират състоянието на зреене, наличието на вредители в определени области. Приложение е разработено от изследователи от UPM (Мадрид) за нуждите на лозарството. Този нов инструмент например анализира изменението на температурата и влажността във всяка от различните области и прогнозира къде е вероятно да има замръзване. По този начин фермерът може да предотврати проблем, преди той да се случи, като сведе до минимум времето за откриване и местоположението на областите с най-голям риск.

Например XY Surface SA Mendoza е една от множеството компании, разработила онлайн приложение чрез картографиране на данни за по-голяма точност в лозарството. Някои от най-големите производители на вино вече използват тези системи.



Фигура 2. Сензори в лозарството



Фигура 3. SensITG Agro-презентация на обработени данни от сензори.

SensITG Agro е решение, което позволява на техническия ръководител да има информация в реално време чрез онлайн достъп на множество критични параметри на земята, по насажденията и /или околната среда. Технологиата позволява поставяне на множество точки на измерване. Всички точки комуникират помежду си без кабели, а информацията е налична в уеб сайт, предоставена от ITG, без допълнителен софтуер. Какво може да се измери? Обичайните параметри на всяка метеорологична станция като: влага и температура на почвата, съдържанието на вода в почвата, а също и дебелината на ствола на растението, слънчевата радиация и други измерими параметри, чрез съществуващите модели сензори на пазара. Системата дава възможност за контрол

на ключови процеси в представителни области на производството, критични периоди от началото на появата на заболяване или контрол над експериментални производствени площи.



Фигура 4. Сензори в селското стопанство

Аналогично приложение е описано в примера с решението Агрегат [Агрегат 2013]. „Агрегат” може да се използва за наблюдение чрез множество сензори и интегрирано управление на логическите операции. Да предположим, че се управлява обширен парник. Той трябва да бъде поддържан с определена температура и влажност. Тези параметри се променят непрекъснато през денонощието. В този случай мрежата от сензори е разположена на цялата територия на парника и може да бъде свързана към централен сървър, който постоянно предава показанията на сензорите. При достигане на определен праг (например твърде ниска влажност на въздуха) се предприемат автоматични коригиращи действия - вода влиза в дюзата и въздухът е овлажнен. Могат да се създават отчети, които показват колко енергия и вода консумира оранжерията, а тази информация да се използва за ефективно планиране на използването на пространството и ресурсите. С цел оптимизиране на сензорите и разширяване на техните възможности минимизацията при хардуера дава възможност устройствата да поддържат собствена операционна система - подобно на портативен компютър. Пример за подобна операционна система е описан по – долу, както следва.

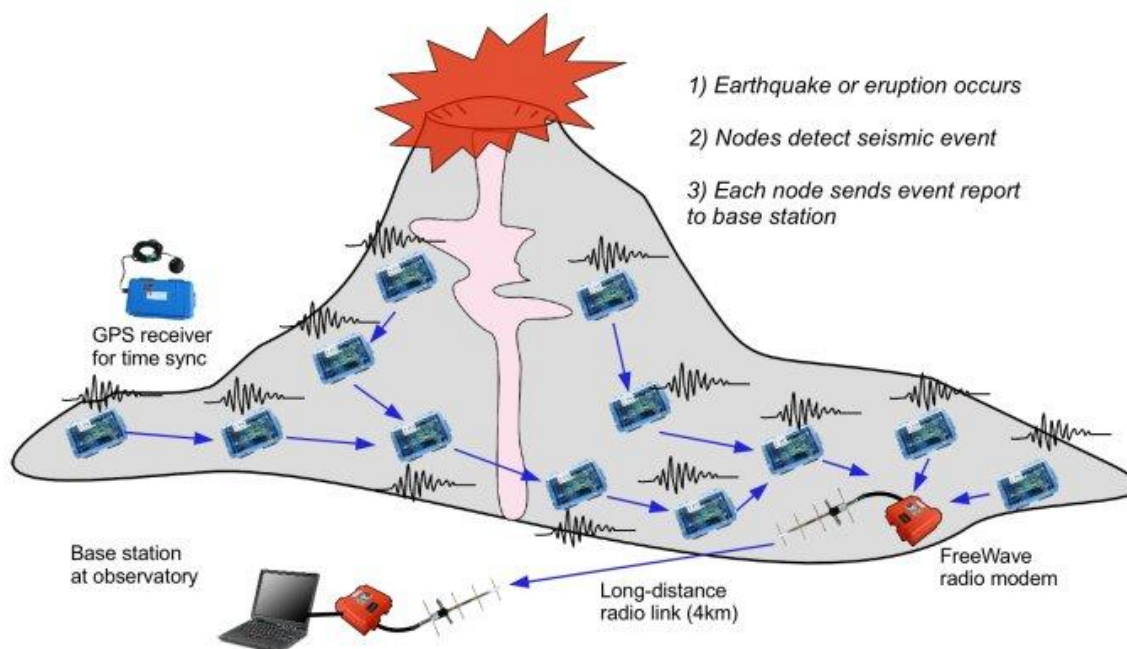
TinyOS е операционна система (ОС) с отворен код, проектирана за нискоенергийни безжични устройства, (сензорни възли или ВЕКВ), използвани в безжични сензорни мрежи, масова електроника, домашни мрежи, интелигентни сгради, както и интелигентни измервателни уреди. По данни на TinyOS тази ОС има средно 35 000 сваляния на година (източник <http://www.tinyos.net/> 2013г).



Фигура 5. Програмируеми сензори, поддържащи операционна система TinyOS

Друг пример за успешно приложение на безжични сензорни мрежи предлагат изследователи от Лабораторията за сензорни мрежи към университета в Харвард, които проучват и разработват различни софтуерни решения за ефективни методи за високочестотна комуникация на данни в адаптивни безжични сензорни системи, работещи в мрежа.

Този интердисциплинарен проект -Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano, Geoff Werner-Allen, Konrad Lorincz, Mario Ruiz, Omar Marcillo, Jeffrey Johnson, Jonathan Lees, Matt Welsh, IEEE Internet Computing, March/April, 2006, изследва използването на безжични сензорни мрежи за наблюдение на изригвания на активни и опасни вулкани. Безжичните сензорни мрежи имат потенциал да допринесат значително за разбирането ни за вулканичната дейност. Ниските изисквания на разходите и размера БСМ имат огромно предимство пред съществуващата апаратура, използвана във вулканични полеви проучвания. Тази технология ще позволи разгръщане на сензорни масиви с по-голяма пространствена разделителна способност и възможност за интеграция, отколкото съществуващите кабелни станции за наблюдение (източник <http://fiji.eecs.harvard.edu/Volcano> - 2013г).



Фигура 6 Безжична сензорна мрежа за изследване на вулкани

Сходни приложения са описани в [Werner-Allen 2006].

Приложенията на безжични сензорни мрежи не се изчерпват с гореизброените примери за наземно разгръщане. В някои индустрии, като добив на суров петрол например, се търсят решения за подводно разполагане и комуникация на БСМ за осъществяване на подводно наблюдение. Повечето пазарни анализатори предполагат, че приложението на безжичните сензорни мрежи расте, така както физическият обем на сензорните възли намалява, заедно с единичната им крайна цена и не на последно място, удължаване срока на използване на батериите.

1.3 Топология при безжични сензорни мрежи

Безжичните сензорни мрежи са продължение на традиционните кабелни мрежи и както традиционните кабелносвързани мрежи, тук също се използват вече познати мрежови топологии. Най-често възлите в сензорната мрежа са произволно разпръснати, а разположението на отделните възли и вида на връзките между тях определят топологията на мрежата. Разликите идват от модела на комуникация и различните видове устройства. Устройствата разполагат с различни технически възможности и могат да бъдат интегрирани в различни топологии безжични сензорни мрежи. Също

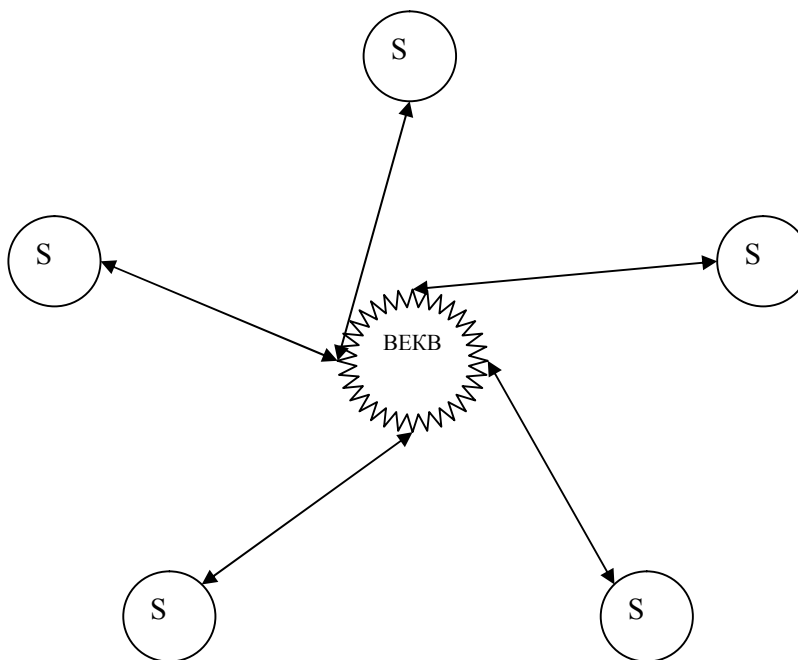
така разликите зависят и от възможностите за комуникация, които всяка една топология предлага като цяло. (източник <http://automation-bulgaria.com/statiadetails.aspx?id=671> 2013г).

Най - разпространените топологии безжични сензорни мрежи са три:

- Топология тип звезда
- Топология тип око
- Хибриден тип.

1.3.1. Топология на мрежа тип "звезда" (Star Network).

Наименованието им следва от пространственото разположение (фиг. 7)



Фигура 7. Мрежа тип звезда

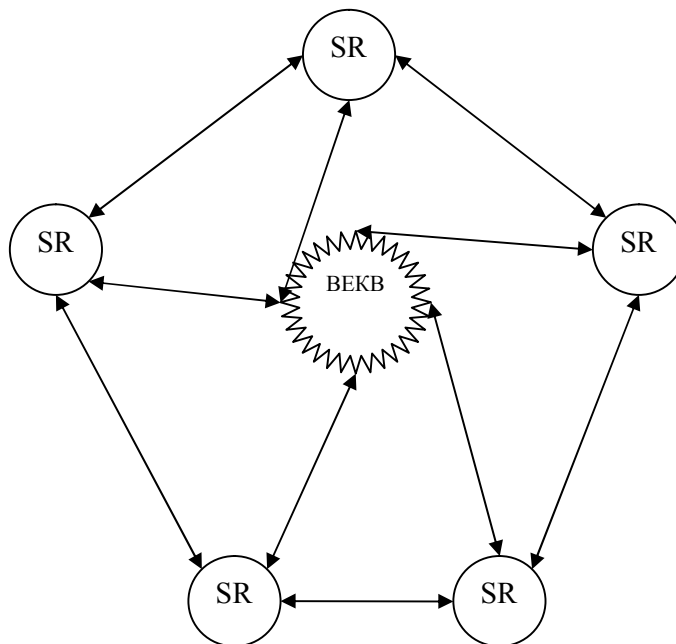
на крайните сензорни възли около ВЕКВ. ВЕКВ е специализиран възел за бърз обмен на данни, но функциите му могат да бъдат поети от компютър. Предназначението му е да управлява работата на S –сензорните възли, да обменя данни с тях и да препредава събраните данни към други мрежи. На фигура 7 – с S са обозначени безжични сензори, които могат да бъдат два основни типа - пълно функционални устройства и устройства с намалена функционалност. Първите поддържат пълния набор от функции и могат да засичат отклонения, да предават собствени данни и да препредават данни от други

възли към БЕКВ. В същото време устройствата с намалена функционалност не поддържат пълния набор от функции и могат да засичат отклонения, да предават собствени данни, но не и да препредават данни от други възли. При последните е нужна по-малко памет и консумация на енергия за сметка на функциите им и това ги прави не толкова атрактивни от пазарна и инженерна гледна точка.

Мрежите тип "звезда" са еднотактни системи (Single-Hop System), което означава, че данните от предавателя (сензора - S) се прехвърлят в приемника (БЕКВ) в един такт (с един "скок"). Структурата им е от типа "точка към точки" (Point-to-Multipoint), каквато е и връзката между устройствата при ползване на стандарта Bluetooth. Предимство на тези мрежи е, че имат относително ниска консумация в сравнение с други топологии. Звездообразните и мрежестите мрежи(топологии), които се изграждат съгласно стандарта IEEE 802.11 трябва да имат точно един БЕКВ. При звездообразната топология устройствата могат да бъдат пълно функционални устройства или устройства с намалена функционалност, но функционират като крайни устройства и комуникират директно с БЕКВ, тоест информацията достига до БЕКВ само с един преход.

1.3.2. Mesh Network мрежи („мрежести” или „око”)

Структурата им е от типа точки към точки (Multipoint-to-Multipoint) и е визуализирана на фиг. 8.



Фигура 8. Мрежа тип Mesh Network

Този тип мрежи също имат БЕКВ (изобразен в средата на фигура 8), но сензорите възли обозначени с (SR на същата фигура) освен с функциите за наблюдение са натоварени и с функция на маршрутизатори, които обменят данни през БЕКВ, но и помежду си. По този начин връзката между два възела може да е непосредствена, но много по-често преминава през други възли. Така на данните са необходими няколко такта, за да достигнат до приемния възел (няколко “скока” от възел на възел), което показва, че този тип мрежи са многотактови системи (Multi-Hop System). Освен това са възможни няколко маршрута между които и да са два възела, като на протоколно ниво в мрежата се избира оптималния от тях. Това, от своя страна, означава намаляване на общата консумирана от мрежата енергия, поради факта, че необходимата излъчвана мощност е право пропорционална на квадрата от разстоянието.

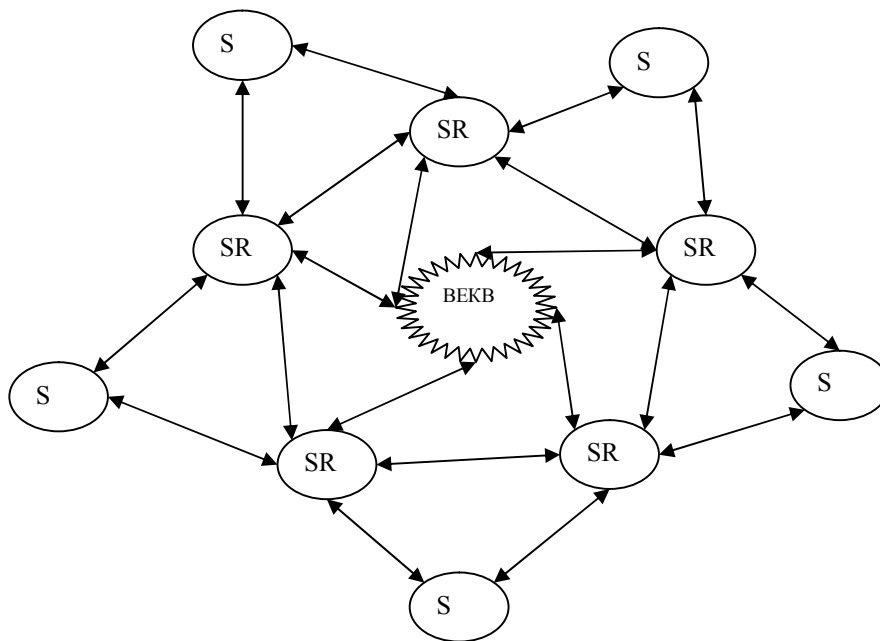
С цел ограничаване на енергийната консумация протоколът на работа на БСМ осигурява прецизна синхронизация на обмена на данни – процесът може да се опише по следния начин: предаващият възел изпраща контролен пакет за включване на приемащия възел, той реагира бързо, приема данните и веднага се изключва. Подробна информация може да се намери в проекти, като „OpenWSN”, където авторите предлагат конкретни решения [OpenWSN 2013].

При повреден възел или големи смущения по маршрута, алгоритми в протоколите автоматично намират друг маршрут, което прави такива мрежи самовъзстановяващи се мрежи (Self-Healing, Self-Repairing Network). При включване и изключване на сензор към мрежата и при наличие на движещи се сензори в нея (както при GSM мрежите) BCM на протоколно ниво променя маршрутите, което я прави и самоорганизираща се мрежа (Self-Configuring Network). Самоорганизацията на връзките позволява мрежата автоматично да разпознава и включва в действие всеки нов възел, като така се спестява ценно време за ръчно въвеждане и администриране на отделните възли.

Структурата на мрежите от този тип се нарича „точка към точка към точка” (Point-to-Point-to-Point, Peer-to-Peer). Разликата от безжичните сензорни мрежи тип "звезда", където цялото управление е съсредоточено във ВЕКВ, е че при този тип безжични сензорни мрежи управлението е разпределено между всички възли (Distributed Control). Освен подsigуряването на връзките, безжичните сензорни мрежи с такава топология могат да покриват по-голяма площ (теоретически неограничена) за относително ниски разходи в сравнение с тези от тип „звезда”. Проверката и функционална диагностика на възли, а и на мрежата като цяло, може да бъде направена с помощта на диагностичен прибор или на компютър.

1.3.3 Топология на мрежи от хибриден тип, звездо-мрежови (Star-Mesh Network)

Топологията на мрежи от хибриден тип, звездо-мрежови (**кълъстерна топология**) представлява комбинация от двата предходни вида в опит да се съчетаят предимствата им.



Фигура 9. Мрежа от хибриден тип

При тях (фиг. 9) към всеки маршрутизатор са свързани крайни възли в тип „звезда”, а маршрутизаторите и управляващият възел (BEKB) образуват мрежова структура. При това всеки краен възел има връзка с повече от един маршрутизатор, което осигурява търсенето на различни маршрути за данните.

Увеличаването на броя на възлите в последните два вида безжични сензорни мрежи води до експоненциално нарастване на количеството на контролните пакети. За избягване на този проблем в мрежи с много възли се използват основно два подхода. Единият е реализация на мрежата с два или повече управляващи BEKB, което намалява броя на тактовете и съответно на контролните пакети (този подход е подобен на използвания в Ethernet и мрежите по стандарта IEEE802.11). Другият подход е обединяване в маршрутизатора на данните от няколко безжични сензора (Data Aggregation) и предаването им по мрежата с един контролен пакет.

1.4 Комуникационни стандарти за WSN

В областта на безжичните сензорни мрежи популярните установени стандарти в момента са следните:

Wireless HART

Протоколът използва синхронизиране по време, на база на архитектура за самоорганизиране и самовъзстановяване. Протоколът поддържа операции в 2.4 GHz ISM честотна лента, използвайки IEEE 802.15.4 стандартни радиостанции. Основната безжична технология се основава на работата на технологията – „Мрежи от пращинки”-мрежи, чиито сензори са с микроскопични размери.

WirelessHART е одобрен от IEC (International Electrotechnical Commission) като първи международен стандарт за безжична комуникация в автоматизирането на процеси.

Крайното гласуване на IEC потвърждава приемането на WirelessHART за стандарт от крайни потребители и доставчици. В Austin, TX USA, на 6 април 2010 г. - HART ® Communication Foundation (www.hartcomm.org) съобщава, че Международната електротехническа комисия (IEC) е одобрила WirelessHART ® спецификацията като пълноправен международен стандарт (IEC 62591Ed. 1.0). Единодушното гласуване на 26 март 2010 г. от комитетите IEC в 28 страни потвърждава общата световна подкрепа за технологията WirelessHART като международен стандарт за безжична комуникация в автоматизираните процеси. WirelessHART технологията е била утвърдена от потребителите и доставчиците като технически издържано, надеждно и сигурно решение за безжична комуникация в процеса на автоматизация. Все по-голям брой WirelessHART съвместими продукти се предлагат днес от големите световни доставчици, включително ABB, Emerson, Endress + Hauser, Pepperl + Fuchs, Siemens и др.

Издаден през септември 2007 г., WirelessHART е отворен и оперативно съвместим стандарт за безжична комуникация, предназначен да отговори на критичните нужди на индустрията за надеждна, стабилна и сигурна безжична комуникация в реално време, в наблюдение на промишлени процеси, измервания и приложения за контрол. Под WirelessHART работят повече от 30 милиона инсталирани устройства в цял свят. IEC е водеща международна организация, която подготвя и

публикува международни стандарти за електрически уреди и системи, електронни системи, и свързаните с тях технологии [Стандарти 2013].

ISA100

ISA100.11a е стандарт за безжична мрежова технология, разработена от Международното дружество по автоматика (ISA). Официалното описание е „Безжични системи за промишлена автоматизация: контрол на процесите и свързаните приложения” (източник www.isa100wci.org 2013г.).

Комитетът ISA100 е част от ISA и е създаден през 2005 г. за установяване на стандарти и свързаната с тях информация, която да определи реда за прилагане на безжични системи за автоматизация и контрол на околната среда. Комитетът се състои от над 400 професионалисти от областта на автоматизацията и близо 250 компании от целия свят. Комитетът също така представлява крайните потребители, безжични доставчици, системни интегратори, изследователски фирми, консултанти, правителствени агенции и промишлени консорциуми. Членовете на комисията предлагат своята експертиза за развитието на ISA100 серията от стандарти.

През 2009 г. Automation ISA -стандарти установява ISA100 Wireless- институт за съвместимост, известен също като WCI. Институтът ISA100 Wireless притежава схема за сертифициране на „ISA100 съвместимост” и осигурява независими изпитания на ISA100 базирани продукти, за да се гарантира, че те отговарят на ISA100 стандарта.

IEEE 1451

IEEE 1451 е набор от стандарти за интерфейс на интелигентни датчици, разработени от института (IEEE) и Техническият Комитет по Сензорни Технологии към Обществото за Прибори и Измервания. В стандарта се описват набор от отворени, общи, мрежово независими комуникационни интерфейси за свързване на датчици (сензори или изпълнителни механизми) към микропроцесори, апаратура, системи за контрол. Един от ключовите елементи на тези стандарти е определението на датчик за електронни информационни листове (TEDS) за всеки датчик. TEDS е устройство с памет, прикрепено към сензора, което съхранява информация за идентификация на датчика, възможност за калибриране, данни за корекция, както и информация, свързана с производителя. Целта на IEEE 1451 стандартите е да се даде възможност за достъп до датчиците на данни, чрез общ набор от интерфейси без оглед на това, дали датчиците са свързани в системи или мрежи, чрез жична или безжична връзка.

В IEEE 1451 семейството стандарти включва и 1451.0-2007 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats 1451.1-1999 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Network Capable Application Processor Information Model 1451.2-1997 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols & TEDS Formats 1451.3-2003 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Digital Communication & TEDS Formats for Distributed Multidrop Systems 1451.4-2004 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Mixed-Mode Communication Protocols & TEDS Formats 1451.5-2007 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Wireless Communication Protocols & Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats 1451.7-2010 IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducers to Radio Frequency Identification (RFID) Systems Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats.

ZigBee /802.15.4.

Стандартът 802.15.4 за безжични сензорни мрежи предлага по-ниска консумация на енергия с намален обмен на данни. Стандартът е базиран още на синхронен нискоенергиен режим, в който възлите се активират и деактивират, редувайки се. Единствената разлика между другите стандарти и този е честотата на активиране на възлите и трансмисията на данни, която води до общо намаляване консумацията на енергия.

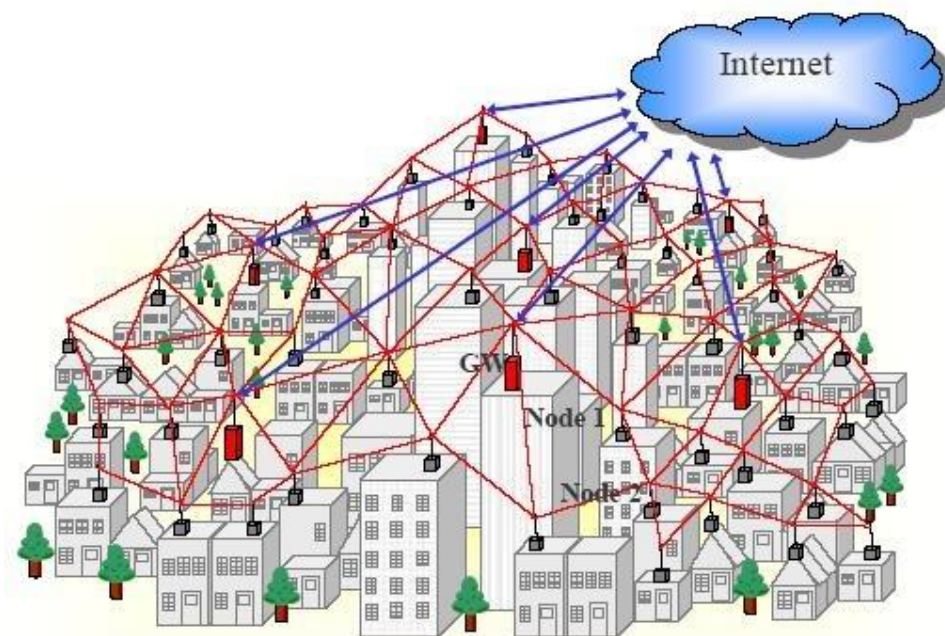
ZigBee е спецификация за пакет от висококачествени протоколи на ниво комуникация, използвани за създаване на лични мрежи с ниска консумация на енергия и използване на цифрови радиостанции за обмен. ZigBee се основава на IEEE 802.15 стандарт.

Въпреки ниската енергия, консумирана от ZigBee устройствата, те често предават данни на по-дълги разстояния чрез предаване на данни през междинни устройства за достигане до по-далечни дестинации. Създавайки мрежа без централизиран контрол или висока мощност на предавател/приемник, данните в ZigBee мрежата могат да достигнат до всички мрежови устройства. Децентрализирания характер на тези безжични мрежи ги прави подходящи за различни приложения. ZigBee се използва в приложения, които изискват ниска скорост на данните, дълъг живот на

батерията и сигурна мрежа. ZigBee има определена скорост от 250 Kbps, най-подходяща за периодични данни или едно предаване на сигнала от сензор или входно устройство към БЕКВ.

Приложенията включват: безжични ключове за осветление, системи за управление на трафика, както и потребителско и промишлено оборудване, което изисква малък обем на безжичен пренос на данни на относително ниски цени. ZigBee мрежите са обезпечени с 128 битови симетрични криптиращи ключове. Такива мрежи се използват в приложения за автоматизация на дома, където преносните разстояния са в интервала [10,100] метра, в зависимост от мощността и екологичните характеристики (източник <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/FAQ.aspx> 2013г.).

ZigBee се заражда през 1998 г., а е стандартизиран през 2003 г. и преработен през 2006. Името се свързва с танца на поклащане на медоносните пчели, след завръщането им в кошера.



Фигура 10. Безжична сензорна мрежа в градски условия

Източник на илюстрация: <http://www.incore.me/svyaz/yachejkovye-mesh-seti-proekt-standarta-ieee-802-11s/> 2013г.

Съответствието на използваните елементи за изграждането на БСМ с някои от посочените стандарти гарантира възможността една и съща БСМ да бъде изградена от устройства на различни производители. За нуждите на последващо разширение или

подмяна на дефектирало оборудване също може да се избира оптималното предложение, без изискване да се използват устройства от определен производител.

1.5 Изисквания към безжичните сензорни мрежи

Съвременните безжични сензорни мрежи трябва да удовлетворяват определени изисквания, което е предпоставка за успешно внедряване и работа в практиката.

Основното изискване е сигурност и непрекъснатост на връзка, която да осигурява предаване на данните в динамична среда. Тази надеждност е свързана с възможността сензорите на мрежата да бъдат разгърнати в сензорното поле, така че да установят максимално, а в някои случаи пълно покритие на зоната за наблюдение, като спазват условието за пълна комуникационна свързаност на сензорните възли в мрежата.

Динамичните условия предполагат също така и възможност за лесно и бързо разширение на наблюдаваната зона, което предполага изискване за разширяемост на мрежата. Необходимо е БСМ да притежават възможност за увеличаване на броя на възлите, без това да води до високи разходи.

Мрежите (БСМ) трябва да имат бърза реакция по отношение на времето от отчитане и регистриране на измененията в наблюдаваното поле (Responsiveness). Времето за реакция може да достигне до няколко милисекунди при мрежи с по-голям брой сензорни възли. В някои специфични сектори се цели да се осигури подвижност (Mobility), което е способност за промяна на пътищата за връзки между възлите и възможността мрежите да съдържат подвижни възли.

От оперативна гледна точка мрежата трябва да бъде комуникационно свързана, а от гледна точка на експлоатацията е важно захранването (батериите) на сензорните възли да имат възможно най-дълъг живот. Основни експлоатационни разходи са свързани с единичната цена на сензор и с цената на използваните батерии за сензора. Различните модели сензори могат да струват от няколко евроцента, до няколко хиляди евро, а различните модели батерии към тях могат да се сменят на 30 или 60 дни или друг интервал. На практика имаме сценарий при който се търси оптимално покритие с минимален брой сензори, което е евтино за изграждане и в същото време минимален разход на енергия, което е евтино за експлоатация.

Едно от ограниченията за още по-широкото навлизане на безжичната сензорна технология е консумацията на енергия. Независимо от въведените подобрения при

производството на батерии, сензорите продължават да се нуждаят от презареждане или смяна на батериите. Това е сериозен проблем за труднодостъпните и отдалечени райони, както и за пространства, в които са инсталирани голям брой сензори.

Изследователите се опитват да разрешат този проблем, като конструират сензори, използващи енергията на естествени източници – вибрации от клатещи се мостове, работещи машини, дори стъпките на пешеходци. Така животът на батериите би могъл да се увеличи. Безжичните сензорни мрежи трябва да са енергийно ефективни и да консумират малко енергия при работа. Това води до по-дълъг експлоатационен срок на мрежата като цяло.

В зависимост от конкретното приложение на безжичните сензорни мрежи могат да възникнат някои специфични изисквания по отношение на подходящ честотен диапазон на радио предавателите на сензорните възли. При избора на честотен обхват на БСМ за определено приложение трябва да се има предвид, че честотният обхват на радиопредавателя трябва да бъде съобразен с определени изисквания. Например изборът на по-ниски честоти е подходящ за помещения с големи подвижни и неподвижни обекти (като резервоари, машини, електрокари и поточни линии), както и при наличие на замърсявания във въздуха. Използването на високочестотните обхвати помага за избягване на някои смущения от производствени процеси и други смущения. Същевременно излъчването във високите честоти може да се реализира с по-малка излъчвана мощност и по-малка постояннотокова консумация.

Глава 2

Метод на мравките за решаване на комбинаторни оптимизационни задачи

2.1 Мравките в природата.

В тази глава ще направим кратко отклонение към света на биологията, за да представим описание на част от характеристиките на насекомите, чийто естествен модел на поведение е заимстван за създаване на методология. Ще представим някои факти и закономерности, свързани с поведението на мравките, които са провокирали интереса на редица автори от различни научни направления и които впоследствие са довели до създаването на метода на мравките. На базата на този метод сме разработили алгоритъм за решаване на задачата за изграждане на БСМ, която е *NP*-трудна задача.

Известно е, че МРАВКИТЕ:(от латински: *Formicidae*) са семейство насекоми с пълно превръщане, от разред Ципокрили (*Hymenoptera*). В световен мащаб са известни около 14 000 вида, а в България – 108 вида по данни на Институт по зоология към БАН [Атанасов 1992].

Както други ципокрили като пчелите и осите, мравките също са обществени насекоми със силно изразен полиморфизъм. Последното означава, че съществуват (морфологично) различни по форма индивиди в рамките на същия вид, изпълняващи различни функции. Мравките живеят в гнезда и колонии (мравуняци) от 10 индивида до няколко стотици милиона индивида. Мравуняците се изграждат в почвата, дървесината, под камъни и цепнатини. Има и видове, които обитават гнездата на други видове мравки, като същевременно подчиняват семейството гостоприемник и го превръщат практически в свой роб. Други видове са се приспособили да живеят в жилищата на човека. Социалният им живот е особено сложен и е свързан с различни форми на комуникация – най-често и основно химическа – *чрез феромони*. Сложното поведение се основава на система от инстинкти. Установени са отношения на симбиоза между мравки и разнообразни други организми – едноклетъчни, гъби, низши и висши растения, ракообразни, паякообразни, насекоми (включително други мравки) и други. Някои видове успяват да регулират числеността на други насекоми, които са вредители за селското стопанство.



Фигура 11. Мравките в природата.

Разпространени са по целия свят с изключение на Антарктида и някои отдалечени острови, образувайки 15 - 25% от биомасата на всички сухоземни животни. Успехът на съществуването на мравките се дължи на разнообразните среди на обитание, социалната структура на организация, способността непрекъснато да променят своето място на обитание и да използват разнообразни хранителни ресурси (източник [Мравки 2013]).

2.1.1 Класификация

Семейство мравки включва 21 съвременни и пет изкопаеми подсемейства, 54 триба, 378 рода, 12 470 вида и 4 515 подвида. Трудността при класифицирането на видовете се дължи на наличието на видове двойници и на видове хибриди. Съществуват множество видове, които практически не се различават с невъоръжено око. Така е възможно описан вид с характерни белези да бъде изолиран репродуктивно от представители със същите белези. Единственият начин да бъдат различени е генетичен анализ на екземплярите. В други ситуации два близкородствени вида, но различаващи се по външен вид, могат лесно да се размножават и да образуват хибридно поколение.

2.1.2 Морфологично описание

Мравките се отличават в своята морфология от останалите насекоми по наличието на начупени антени и метаплеврални жлези и по силно редуцирания втори коремнен сегмент (петиола). Трите обособени части на тялото са: глава, мезосома и метасома. Петиолата, която при някои видове може да включва и третия коремнен сегмент, образува тънка връзка между мезосомата (гръдната част и първият коремнен сегмент) и метасомата (коремната част зад петиолата). Както и останалите насекоми, мравките имат екзоскелет, външно покритие, което защитава вътрешността на тялото и към което се прикрепват мускулите. Насекомите нямат бели дробове – кислородът и други газове като въглеродният диоксид преминават през екзоскелета през малки отвори. Те нямат и затворена кръвоносна система, а само дорзална аорта (дълга тънка перфорирана тръба в горната част на тялото), която действа като сърце и изпомпва хемолимфа към главата, задвижвайки по този начин флуидите в тялото. Нервната система се състои от коремна нервна връзка, преминаваща по дължината на цялото тяло, и няколко ганглия и разклонения, достигащи до крайниците и антените.



Фигура 12. Вид мравка работничка

По главата на мравките са разположени множество сетивни органи. Както повечето насекоми, мравките имат фасетъчни очи, изградени от множество свързани малки лещи. Очите им са пригодени за регистриране на движение, но нямат висока разделителна способност. Мравките имат и по три малки прости очи в горната част на главата, които усещат интензивността и поляризацията на светлината. В сравнение с гръбначните повечето мравки имат много слабо до средно зрение, а някои видове са

напълно слепи. Рядко се срещат отделни видове, като някои представители на род *Myrmecia*, които виждат добре.

Това е една от причините за интереса на учени от други области към този вид насекоми и фактите относно разпространението и възрастта на вида, въпреки относително ограничената сетивност.

Двете антени, прикрепени към главата, усещат разликите в концентрацията на някои химически вещества, като феромона например. Също така с тях усещат движението на въздуха и механичните вибрации. Освен това те могат да се използват за пряка комуникация - предаване и приемане на сигнали чрез докосване. В предната част на главата са разположени две силни челюсти, които мравките използват за пренасяне на храна, манипулиране на предмети, при строителството на мравуняци и за защита. При някои видове в малък джоб във вътрешността на устата може да се съхранява храна, която мравките дават на други мравки или на ларвите си.

И шестте крака на мравките са прикрепени към мезосомата. Подобни на куки образувания в краищата на краката помагат на мравките да се изкачват или провесват върху различни повърхности. Обикновено цариците и мъжките мравки имат крила, като тези на цариците падат след брачния полет, но на мястото им остават малки израстъци, по които те могат да бъдат отличени от другите мравки. При някои видове цариците и мъжките нямат крила.

В метазомата на мравките са разположени основни вътрешни органи, включително тези на размножителната, дихателната и отделителната система. При мравките работнички от много видове яйцеполагалото е модифицирано в жило, което служи за залавяне на плячка и за защита на мравуняците.

2.1.3 Разпространение и многообразие

Регион	Брой на видовете
Неотропик	2162
Неарктик	580
Европа	180
Африка	2500
Азия	2080

Регион	Брой на видовете
Меланезия	275
Австралия	985
Полинезия	42

Мравките се срещат на всички континенти с изключение на Антарктида, като само на няколко големи острова като Гренландия, Исландия, части от Полинезия и на Хавайските острови липсват местни видове, а намиращите се на тях са привнесени. Мравките заемат широк спектър от екологични ниши и се хранят с широка гама от хранителни ресурси. Те биват преки или непреки тревопасни животни и хищници. Повечето видове са всеядни и много малко видове са тясно специализирани в консумацията на определен вид храна. Тяхното екологично господство се изразява в общата им биомаса. Според различни оценки тя е 15-20% (почти 25% в тропиците) от общата биомаса на сухоземните животни. Това надвишава като цяло биомасата на гръбначните животни.

Мравките са с размер от 0,75 до 52 mm и са разнообразни по цвят. Повечето мравки са червени или черни, но някои видове са зелени, а някои тропически видове имат метален блясък. Известни са повече от 12 хиляди вида (предполага се, че достигат до около 22 000) като най-голямо разнообразие има в тропиците. Таксономични изследвания продължават да развиват класификацията и систематиката на мравките.

Мравките усвояват разнообразни източници на хранителни вещества. Различните видове се хранят с растения, насекоми, с медената роса, отделяна от листните въшки, с гъби, които отглеждат в мравуняка, и други органични продукти.

2.1.4 Взаимоотношения между мравките в колонията

Семействата на мравките са многогодишно високоорганизирано съобщество, съставено от яйца, личинки, какавиди и възрастни екземпляри от женски, мъжки (търтеи) и най-многочислената част от мравки работнички, които практически са безплодни.

Женските, наричани още *царици*, са големи полово развити мравки, снасящи яйца (до 30,000 яйца на ден). Може да има една или няколко в един мравуняк и живеят няколко години, докато работничките рядко живеят дори една година.

Функцията на търтеите е изцяло размножителна, появяват се през брачния сезон и умират скоро след това. Обикновено са крилати и могат да прелитат на близки разстояния.

Работничките са безкрили женски, с недоразвити полови органи. Имат следните функции:

- грижа за яйцата и ларвите — преместват ги в помещения с различна температура в зависимост от възрастта им и ги хранят
- строеж и поддръжка на мравуняка
- събиране на листа и други хранителни продукти в мравуняка.

Някои видове с по-сложни общества имат няколко подкасти на работничките, различаващи се по размер и други характеристики. При вида на мравките листорезачки най-интересната подкаста е тази на „войниците“, която обикновено се разглежда като отделна каста заради специфичната си морфология и функция.

Войници се срещат при някои видове мравки. Представяват едра форма работнички, която се характеризира с по-голяма глава и силни видоизменени челюсти, приспособени за отбрана. Освен с челюсти, могат да нападат и с невротоксин. При някои видове функциите им в мравуняка може да са свързани с откриването и локализирането на хранителни източници. Те са с по-голям размер от останалите и така могат да полагат по-голямо количество феромон по пътя от хранителния източник към гнездото, а и да обхождат по-широк периметър. Обикновено излизат сутрин преди другите и когато се върнат, останалите с голяма вероятност следват техните маршрути за храна. В случай, че поради опасност или смърт не се завърнат в гнездото, колонията може да е застрашена, докато не отгледа следващо поколение войници - разузнавачи, които да се изпатят на лов.

Мравките живеят в организирани групи, наречени колонии (мравуняци) и имат сложни отношения помежду си. Работниците вършат цялата работа в семейството — търсят и донасят храна, грижат се за майката, нейните яйца и ларвите, играят ролята на строители. Движейки се, те оставят след себе си феромонові знаци и така съобщават на другите мравки за местоположението на храната. Отделната мравка не може да оцелее без мравуняка си. Това е причината биолозите да обозначават цялото семейство насекоми като един-единствен индивид, чиито части не са свързани, а се движат свободно.

Мравките имат изключително силно обоняние и контактуват помежду си основно чрез феромони. Чрез коремните си жлези те отделят секрети, които подават

информация на семейството. Секретите са различни - за маркиране на път към храна, полови секрети, сигнали за опасност, феромони за разпознаване на вида и на службата, която изпълняват.

Мравките са строго кастови насекоми, като всеки от колонията има отделна функция. Седемдесет и пет процента са работници, с различни задачи. Някои работници са земеделци, други отглеждат кралицата и малките, трети са войници, а строителите се грижат за прокопаване, заздравяване и поддръжка на подземния град.

В една колония от мравки работят единствено женските. Мъжките мравки се отглеждат в определени моменти и участват само в размножителния процес. Животът на мъжките е с най-ниска продължителност и трае от броени дни до няколко седмици или месец.

Колонията мравки може да има една или няколко царици майки. Цариците са до 8 пъти по-големи от работничките и живеят най-дълго. Тяхната роля е свързана със снасянето на яйца, а без тях семейството загива. Една царица майка, според вида, може да живее до 30 години.

В колонията мравки често се наблюдават крилати мравки. Крилатите мравки са мъжки мравки или оплодени царици. Те се чифтосват във въздуха. Скоро след това мъжките умират, а майките излитат от мравуняка за да основат нова колония. След намирането на подходящо място, крилатата царица гради новия дом и започва да храни малките, а крилата ѝ падат.

От гледна точка на информатиката, интерес представлява моделът на поведение на мравките в процеса на локализиране и усвояване на хранителни източници за нуждите за оцеляване на колонията като цяло. Отвъд рамките на поведение на отделния индивид в колонията (които лесно могат да бъдат алгоритмизирани или моделирани в компютърно пространство) се откриват глобални правила (модели) за поведението на мравуняка като цяло, които могат да се приложат към конкретни области в математиката и информатиката под формата на оптимизационни алгоритми.

От десетилетия за биолозите е загадка, как е възможно тези насекоми да са способни да изграждат толкова огромни структури като мравуняците, въпреки размерите на индивидите в колонията. За информатиците е интересно какво биха могли да построят в компютърното пространство при съответен модел, както и последващото охарактеризиране и приложение на подобен модел в теорията и практиката.

Мравките комуникират с помощта на феромони (химична субстанция, която произвеждат в организма си). Обонятелните органи са разположени на върха на

антенките им. Чрез отделяне на специфичен феромон мравките подбуждат съответстваща, генетично закодирана реакция у останалите индивиди от колонията. Това могат да са феромони, отбелязващи пътя до находище на храна, сигнализиращи за опасност, свързани с размножаването (както е при търтеите в пчелните колонии) и др.

Феромон е всяко химическо вещество (биохимично съединение) синтезирано от жив организъм и служещо за комуникация с други организми от същия вид. Съществуват най-различни биохимични съединения - феромони, измежду които: алармиращи феромони; полови феромони; агрегационни феромони и др. Използват се най-интензивно от насекомите, но се срещат и при други групи животни.

Мравките използват много феромони при своята комуникация. Когато някоя мравка попадне на източник на храна, тя започва да отделя феромон, който при нейния обратен път към мравуняка оставя своеобразна миризлива пътечка към храната. Всички мравки намерили храна, оставят на връщане тази феромонна следа, формирайки нещо като *ароматна мрежа*, сочеща към източници на храна. Когато няма феромонна следа, мравката поема в произволна посока, но при наличието на такава, мравката *най-вероятно* ще поеме по пътя с най-интензивна феромонна следа. Интересното е, че най-краткият път към дадена храна е и *най-ароматен*, тъй като най-много мравки са го изминали (защото е най-кратък) и по този начин повече мравки ще поемат по него в бъдещ момент. Така се получава автокаталитичен, процес при който мравките откриват най-кратките пътища до източниците на храна. С времето феромонът се изпарява и ако не бъде подновяван, неговото количество намалява. По този начин се предотвратява възможността мравките да следват някоя стара следа, сочеща към вече изчерпан източник на храна.

Мравките отделят и алармиращ феромон при опасност. При някои видове, ако нараните една мравка и я оставите на земята, тя ще отдели феромон, който ще привлече мравки войници на това място. При това те започват да кръжат около мястото в *бойна готовност* и дори и да отстраните наранената мравка, те ще останат там още известно време, докато феромонът не се разсее.

Въпреки многообразната комуникация, основана на отделянето на биохимични вещества, за нуждите на алгоритмичните модели на мравките в компютърно пространство най-често се взема под внимание феромонът, който, като част от глобалната комуникация, служи за комуникация при локализиране на хранителни източници от мравчената колония. Експериментални изследвания са провеждани и описани за видовете *I. Humile* в [Goss et al., 1989], *Linepithema humile* и *Lasius niger* в

[Bonabeu et al.,1997]. В експеримент наречен Двоен мост [Deneubourg 1990], авторите правят изследване на начина на поставяне на феромон и връзката с поведението на мравките. В следващия раздел ще дадем описание на този експеримент.

2.2 Комбинаторна оптимизация по метода на мравките

В предишния раздел представихме познатите характеристики на биологичния вид на мравките и тяхното поведение в природата. В този раздел ще направим преход към областта на информатиката и изкуствения интелект, като разширим смисъла на понятията от биологията с техните аналози в компютърната наука.

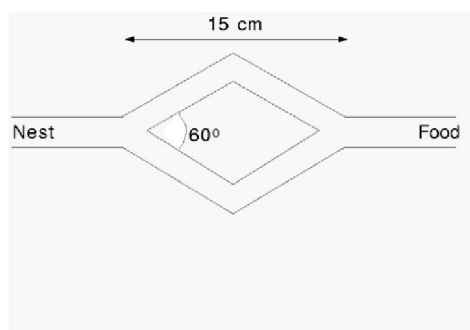
Оптимизация с колония от мравки или метод на мравките (Ant Colony Optimization, ACO) е вероятностен подход за решаване на изчислителни задачи, който може да бъде сведен до откриване на добри пътища (най-къс или най-дълъг) през граф [Dorigo 2004]. Основният такъв алгоритъм и неговите различни модификации образуват подмножество на класа алгоритми за метаввристична оптимизация. Метаввристиката е процедура от високо ниво, предназначена да намери, построи или избере процедура от ниско ниво, която може да осигури намирането на достатъчно добро решение на дадена оптимизационна задача, особено когато информацията е непълна или разполагаме с ограничени компютърни ресурси. Метаввристичните методи за оптимизация са техники, независещи от конкретна задача. При някои тях се допуска възприемане на по-лоши от текущото решение с цел излизане от локален оптимум [Bianchi 2009]. За първи път предложен от Prof. Marco Dorigo в докторската му дисертация от 1992 година [Dorigo 1992], оригиналният алгоритъм за оптимизация по метода на мравките е имал за цел да търси оптимален път в граф на базата на поведението на мравките, търсещи път между своята колония и даден източник на храна. От тогава до днес оригиналната идея на Dorigo е разширявана и модифицирана от различни изследователи, за да се прилага към по-широк клас от задачи. В резултат на това са се появили няколко нови подхода, базирани на различни други аспекти от поведението на мравките.

В серия от експерименти в контролирана среда, „Двоен мост”—описан в [Deneubourg 1989] с мравчени колонии от вида Аржентински мравки (*Iridomyrmex humilis*), с възможен избор между два различни по дължина пътя, водещи до един и същ източник на храна са отчетени любопитни резултати. Важно е да отбележим, че

представителите на *Iridomyrmex humilis* имат почти нулево зрение. Изследователите са установили, че мравките проявяват склонност да откриват най-късия път. Експериментът, обясняващ това поведение, е следният:

По пътя на мравките от хранителния източник към гнездото е поставен двоен мост, на който и двете разклонения са с равна дължина. При този сценарий е установено следното:

Въпреки случайния избор, с който мравките избират откъде да преминат, всички в крайна сметка избират само едно от разклоненията, независимо че са с равна дължина и може да се очаква да преминават и по двете разклонения. Това може да се обясни по следния начин: Когато мравките започват да полагат феромонова следа, по двете разклонения на моста все още няма феромон. По този начин те на случаен принцип следва да изберат някое от разклоненията. Благодарение на случайни колебания някои мравки все пак ще предпочетат едното от разклоненията на моста. Докато мравките се придвижват, те поставят феромонова следа и колкото повече преминават през някое от разклоненията, то толкова повече феромон ще се положи върху избраното разклонение. По-високата концентрация на феромон стимулира повече мравки да изберат да се придвижат отново по разклонението с повече феромон. Този процес се повтаря и в определен момент всички мравки избират да се придвижат по едно и също разклонение.



Фигура 13. Двоен мост с еднакви по дължина разклонения

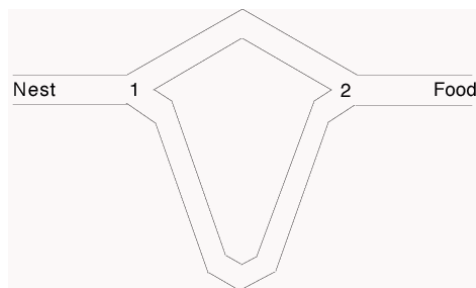
На макрониво имаме колективно поведение, което може да се обясни с взаимодействията между индивидите на колонията. Мравките координират своите действия благодарение на индиректна комуникация, осъществявана с посредничеството на измененията на средата, в която те се движат.

В продължение на гореописания експеримент е проведено следното наблюдение.

Подобно на първия експеримент по пътя на мравките е поставен мост с две разклонения. Разликата се състои в това, че дължината на едното разклонение е два пъти по малка от дължината на другото. В резултат е установено, че след даден момент от време всички мравки избират да се придвижат само по разклонението с по-малка дължина. Както в първия експеримент, и тук мравките започват своето движение от гнездото за да изследват средата, и пристигат в точка (точката на разклоняване), в която трябва да вземат решение да преминат по късото или по дългото разклонение. В този момент и двете разклонения изглеждат еднакво за мравките и те решават на случаен принцип откъде да продължат. При такъв сценарий можем да очакваме, че в общия случай половината от мравките биха избрали едното разклонение, а другата половина – другото разклонение.

Резултатите от наблюдението показват, че когато мравките изберат разклонението с по-малка дължина, те ще пристигнат първи до източника на храна и първи ще започнат обратния си път към гнездото. На този етап, когато при обратното придвижване мравките трябва да направят избор, дали да преминат през късото, или дългото разклонение, техният избор се ръководи от по-високата концентрация на феромон върху по-късото разклонение, на практика при първото връщане феромон има в края само на късия път, защото мравките от дългия още не са пристигнали. Затова мравките ще изберат да се върнат по късия път и ще удвоят феромона му. След като мравките от дългия път пристигнат до източника на храна, феромонът по късия път ще бъде по-концентриран, отколкото по дългия, и те ще изберат да се върнат по късия път. Така феромонът започва да се натрупва по-бързо върху по-късото разклонение на моста и всички мравки решават да преминат по късия път. Интересна е и промяната в поведението на мравките, когато към съществуващите две разклонения се прибави и трето, което да е с най-малка дължина в сравнение с другите.

Когато това се направи, след като мравките вече са избрали по-къс вариант, тогава мравките все още продължават да се движат по установения път и едва след определен период от време включват новото разклонение в маршрута си. Това може да се обясни с факта, че когато новото разклонение е добавено, върху него няма положен феромон и това го прави непривлекателно в сравнение с разклонението, по което мравките вече са минали и оставили следи. Допълнителен фактор за това е и бавното изпарение на феромона, което се отразява върху привлекателността на маршрута.



Фигура 14. Двоен мост с различни по дължина разклонения

При този експеримент се установява, че мравките много по-бързо вземат убедително решение да изберат по-късия път, в сравнение с времето, за което това се случва с установяване на маршрут в предходния експеримент при равни дължини на разклоненията. В допълнение към това са правени наблюдения на поведението на мравките в ситуация, в която по-дългото разклонение на моста е два пъти по-дълго от другото. Въпреки двойната разлика в дължината на разклоненията, не всички мравки се движат по по-късия път. Някои мравки дори и след определено време решават да минат по по-дългия маршрут. Това се обяснява със стремежа на мравките към „разузнаване на средата“. Правен е и експеримент изкуствено да се постави феромон на по-дългия път. Тогава повечето мравки започват да го следват.

В природата тези изключителни насекоми (мравките) първоначално се движат по случаен начин и при откриване на източник на храна се завръщат към гнездото на колонията си, като по целия обратен път полагат следи от вещество, наречено феромон, което служи за комуникация с останалите мравки. Ако други мравки се натъкнат на маршрута на първата мравка, те с голяма степен на вероятност престават да се движат по случаен начин, а поемат по оставената следа от феромон до източника на храна и в случай, че също открият храна, при връщането си полагат собствена следа от феромон върху вече съществуващата. По този начин количеството феромон се увеличава и маршрутът до източника на храна става по-привлекателен за следващите мравки.

Феромонът има свойството да се изпарява с времето, което намалява способността му да привлича други мравки. Колкото повече време отнема на една мравка да премине разстоянието до източника на храната и обратно, толкова повече феромонът се изпарява. За сравнение, един по-кратък път между същите две крайни точки, бива извървян за по-кратко време и интензитетът на феромона остава по-висок. В контекста на алгоритъма на мравките, изветряването (изпаряване - взаимодействие с кислорода и намаляване на концентрацията) на феромона представлява предимство,

тъй като се избягва сходимостта на алгоритъма към решение, представляващо локален оптимум (стагнация).

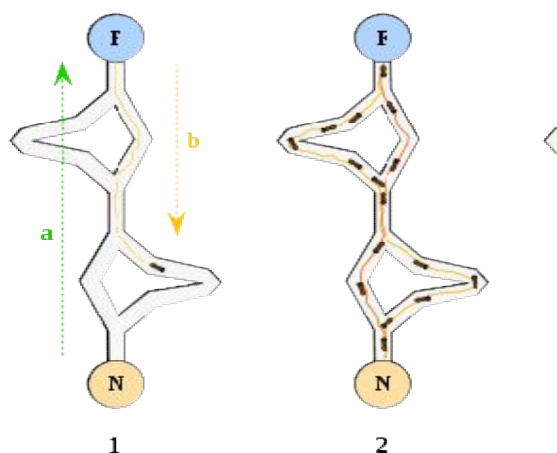
Ако не съществуваше ефектът с изпарението, то пътищата избрани от първите мравки, биха имали тенденцията да са прекомерно привлекателни за всички следващи, което на свой ред би ограничило значително изследваната от мравките област на решенията.

По този начин, когато една мравка открие добър (т.е. кратък) път от мравуняка си до някакъв източник на храна и голяма вероятност и други мравки ще последват нейния път и постепенно положителната обратна връзка ще доведе до това, всички мравки да следват един и същ път. Идеята на алгоритъма за оптимизация по метода на мравките е да се имитира това поведение с „изкуствени“ (симулирани) мравки, които се движат по дъгите на граф, представляващ областта на възможните решения, като мравките се стремят да намерят оптималното от тези решения.

2.2.1 Представяне на алгоритъма

Идеята за алгоритъма на мравките е вдъхновена от наблюденията на това как мравките усвояват източници на храна, и по-специално от наблюдението, че индивидуално ограничените откъм когнитивни възможности мравки, взети заедно, откриват най-кратък път между източника на храната и своя мравуняк. На фигура 15 е представен процесът на търсене на храна от мравките в природата. Той се състои от следните стъпки:

1. Първата мравка открива източника на храна (**F**) по някакъв (без значение какъв) начин (**a**), като маркира пътя си, за да може да се върне. Завръща се в гнездото си (**N**), оставяйки след себе си следа от феромон (**b**)
2. Мравките безразборно следват четирите възможни пътя, но затвърждаването на някой от тях посредством полагането на повече феромон го прави по-привлекателен като маршрут
3. Мравките поемат по най-краткия път, като така дълги отрязъци от други пътища губят привлекателността си, поради постепенното изпаряване на феромона от тях и поради това, че там не се добавя нов феромон.



Фигура 15. Движение на мравките

Те обменят информация индиректно, чрез полагане на феромон по пътя си. Това средство за общуване има локален обхват, защото само мравка, която се намира на място, на което е положен феромон, може да получи информация от предходната мравка. Такава система се нарича „стигмергия” (поставяне на белези) и може да бъде открита в много животински съобщества (изучавана е при строежа на термитни стълбове).

Този механизъм за решаване на дадена задача, която е твърде сложна за отделен индивид, се явява добър пример за самоорганизираща се система. Такава система се основава на положителна обратна връзка (полагането на феромон привлича други мравки, които, следвайки следата, сами я подсилват) и на отрицателна обратна връзка (излиняването на пътя поради изпарението на феромона, което предотвратява системата да се препълни с информация и да се срине).

На теория, ако количеството феромон остава по всички пътища непроменено във времето, то никой маршрут няма да се изяви като по-привлекателен пред останалите.

На практика, дори и слаби изменения в привлекателността на дадени пътища (слаба разлика в концентрацията на феромон) позволяват даден маршрут да бъде предпочетен, което с нарастващия брой на мравките, които го избират, води до формирането му като желан.

Алгоритъмът се променя от състояние на неустойчивост (когато всички пътища в графа са еднакво привлекателни) към състояние на устойчивост (при което маршрутът се състои от най-привлекателните дъги в графа). Процесът на търсене протича по следния начин:

1. Една мравка се движи повече или по-малко на случаен принцип в близост до колонията си
2. Ако тя се натъкне на източник на храна, тя се връща относително директно в мравуняка, като по обратния път оставя след себе си следа от феромон
3. Следите от феромон са привлекателни за другите мравки и тези, които се намират в съседство, са предразположени да поемат по оставената следа, следвайки я сравнително плътно
4. При завръщането си в мравуняка тези мравки усилват следата от феромон по маршрута
5. Ако до един и същ източник на храна водят два пътя, за едно и също количество време повече на брой мравки ще изминат по-краткия, отколкото по-дългия път
6. Тъй като повече мравки ще изберат по-късия път, той ще бъде подсилван с феромон от все повече мравки
7. По-дългият път в крайна сметка ще се загуби, тъй като феромонът е летливо вещество и се изпарява с времето
8. Накрая всички мравки решително ще изберат пътя с високо насищане на феромон, следователно ще бъде открит най-късият път между източника на храната и мравчената колония.

Алгоритъмът на мравките най-общо може да се представи по следния начин. Задачата се представя с граф, така че решението да може да се представи като път в графа или като дърво в графа. На всяка итерация всяка от мравките започва да строи своето решение, започвайки от случаен връх в графа. Случайният старт представлява метод за разнообразяване на търсенето на решение. Поради това броят на използваните мравки може да е сравнително малък. Може да се използва и само една мравка, но тогава са необходими повече итерации. Обикновено се използват до 20 мравки, дори и за големи задачи [Dorigo 2004]. Малкият брой мравки води и до по-малко компютърни ресурси като време и памет. За сравнение при генетичните алгоритми обикновено са нужни поне 100 индивида, за да се постигне добро решение. Мравката избира следващ връх от графа, който да добави в решението, като използва функция, наречена вероятност на прехода. Тази функция е произведение от количеството феромон, съответстващо на този преход, и евристична информация. Поради това в метода на мравките се поставя начален феромон, чиято стойност е по-голяма от 0. Обикновено това е число между 0 и 1. Количеството феромон представя опита на мравките от предходните итерации. Евристичната информация е функция, представяща

предварителното познание за задачата. Конструирването на евристичната информация е съществено за намирането на добри решения. Това обикновено е подходяща комбинация от параметрите на целевата функция и ограниченията на задачата. Мравката избира да добави към решението върха за който вероятността за преход е най-голяма. Ако има два и повече върха с равна вероятност, то се избира един от тях на случаен принцип. След като всички мравки построят своите решения, обновяваме феромона. Основното правило е елементите на по-добрите решения (спрямо стойността на целевата функция при едноцелевите задачи и оценъчната функция при многоцелевите) да получат повече феромон от останалите и така да станат по-желани на следващата итерация. Първо феромонът се намалява (изпарява), за да се намали влиянието на старата информация. След това се добавя нов феромон, който е пропорционален на стойността на целевата функция ако задачата е за намиране на максимум, и обратно пропорционален – ако е за намиране на минимум. Феромонът може да се постави или на ребрата или на върховете, в зависимост кое е по-подходящо за конкретната оптимизационна задача.

Вероятност на прехода

Мравката се придвижва от връх i до връх j на графа с вероятност:

$$p_{ij} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}{\sum (\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)} \quad (1)$$

където

- $\tau_{i,j}$ е количеството феромон съответстващо на прехода от връх i във връх j ;
- α е параметър за контрол на влиянието на $\tau_{i,j}$
- $\eta_{i,j}$ е евристичната информация, тя представлява предварително познание за задачата и често е комбинация от параметрите на целевата функция и ограниченията;
- β е параметър за контрол на влиянието на $\eta_{i,j}$

Обновяване на феромона

$$\tau_{i,j} = (1-\rho)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}^k, \quad (2)$$

където:

- $\tau_{i,j}$ е количеството феромон съответстващо на прехода от връх i до връх j .
- ρ е скоростта на изпарение на феромона.

$\Delta\tau_{i,j}^k$ е количеството на новоотложения феромон от мравка с номер k , обичайно представен чрез формулата:

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{1}{L_k} & \text{(ако мравка с поредност } k \text{ премине по реброто } i,j) \\ 0 & \text{в противен случай} \end{cases} \quad (3)$$

където L_k е стойността на целевата функция за решението построено от k мравката. Формула 3 се отнася за случая, когато се търси минималната стойност на целевата функция. Когато се търси максималната стойност на целевата функция, във формула 3 стои стойността на целевата функция за решението, построено от k мравката, а не нейната реципрочна стойност. Условието за построяване на решение от мравката (условие за край) е, когато е невъзможно добавяне на следващ връх в решението или това е, когато вероятността за следващ преход е равна на 0.

По-долу схематично е показан алгоритъмът на мравките.

Процедура ACO

Начало

Поставяне на начален феромон

While удовлетворяване на критериите за край **do**

Поставяне на всяка мравка в начален връх

Repeat

For всяка мравка **do**

Избор на следващ връх

End for

Until всяка мравка е построила решение

Обновяване на феромона

End while

End

2.2.2 Варианти на основния алгоритъм на мравките

Следват някои от най-популярните вариации на алгоритъма за оптимизация по метода на мравките: мравчена система (Ant System - AS) [Colony 1991], MCEM елитни мравки [Dorigo 1996], система от колонии от мравки (Ant Colony System - ACS) [Dorigo 2000], ACO с допълнително форсиране [Fidanova 2002], Макс – Мин. мравчена система (Max-Min Ant System MMAS) [Stutzle 2000]. Началният вариант на метода, мравчена система - AS, следва точно поведението на мравките в природата. Експериментално е установено, че той отстъпва на другите известни метаевристични методи. Поради това са създавани и разнообразни варианти на метода с цел подобряване на качеството на намерените решения. Основната разлика при отделните варианти на метода е начинът за обновяване на феромона.

Оптимизация чрез елитни мравки

Това е първата по време модификация на алгоритъма, наречена стратегия на елитните индивиди (elitist strategy for Ant System EAS). предложена от Dorigo [Dorigo 1996]. При нея фиксиран брой мравки (една или повече), постигащи най-добро решение, се обявяват за елитни и само те получават право да полагат феромон по маршрута си. Идеята е да се предостави възможност за подсилване на феромоновите стойности за онези елементи на графа, за които се установи, че са част от най-добрите решения, открити до този момент от стартирането на алгоритъма. Това е похват за концентрация на търсенето около вече намерени добри решения, като се предполага, че там съществуват и други добри решения. Ако всички мравки бъдат обявени за елитни, то тогава този вариант съвпада с AS.

Система от колонии от мравки

При ACS основното е, че имаме два вида обновяване на феромона, глобално и локално. При глобалното обновяване на феромона, феромонът на всички елементи на графа, които са част от решения, построени през текущата итерация, бива намаляван (изпаряван) и след това се добавя феромон, равен на началния. По този начин се гарантира, че количеството феромон на елементите на графа ще бъде не по-малко от началния феромон. При локалното обновяване на феромона само елементите на най-доброто решение получават феромон, пропорционален на стойността на целевата функция. С глобалното обновяване на феромона се постига разнообразяване на

търсенето. Предотвратява се възможността стойността на феромона да клони към нула и така някои области от множеството с решения да останат неизследвани. Локалното обновяване на феромона засилва неговата стойност около най-доброто намерено решение и концентрира търсенето в близост до него.

АСО с допълнително форсиране

При този вариант на метода, феромон получават елементите от графа, принадлежащи на най-доброто решение. Феромон получават и елементите от графа, които не са включени в решението на някоя мравка. Феромонът на елементите, принадлежащи на останалите решения, остава непроменен. Така, от една страна, търсенето се разнообразява, като мравките биват форсирани да търсят решения в още неизследвани области от множеството на решенията, като избягват вече намерените недобри решения. От друга страна, има концентрация на търсенето около най-доброто намерено решение.

MAX-MIN мравчена система

Познат още под названието MAX-MIN ACO или MMAS.

Моделът се променя, като се фиксира горна и долна граница на феромона $[\tau_{\max}, \tau_{\min}]$. Феромон се полага само по маршрута, отговарящ на глобално най-доброто решение или най-доброто решение за конкретната итерация. Останалият феромон само се изпарява. Ако количеството феромон на някой елемент стане по-малко от фиксираната долна граница, то той се поставя да бъде равен на долната граница. Така количеството феромон не може да клони към нула и се предотвратява възможността някоя област от множеството с решения да остане неизследвана. Ако количеството феромон на някой елемент стане по-голямо от фиксираната горна граница, то се поставя да бъде равно на горната граница. В началото всички елементи на графа получават феромон, равен на $\tau_{\max}$. С тези промени се цели да няма елементи от графа на задачата, които да концентрират прекалено голямо количество феромон и това да доведе до повтаряне на едни и същи пътища (решения), стагнация на процеса на търсене. От друга страна, се предотвратява феромонът на някои елементи да бъде близък до нулата и тези елементи да станат нежелани.

2.2.3 Сходимост

При някои версии на алгоритъма е възможно да се докаже сходимост. Първото доказателство за условията за сходимост на алгоритъма за оптимизация по метода на мравките за граф базирания алгоритъм на мравките е дадено през 2004 в [Dorigo 2004]. Доказано е, че при ACS, MMAS в [Dorigo 2004] и при ACO с допълнително форсиране в [Fidanova 2004] вариантите на алгоритъма отговарят на изискванията на теоремата за сходимост. Както при повечето метаевристични методи, и тук е много трудно да се направи теоретична оценка на скоростта на сходимост. Теоремата за сходимост на алгоритмите по метода на мравките гласи [Dorigo 2004]: ако феромонът има строго положителна долна граница, то алгоритъмът се сходя към глобалният оптимум, когато броят на итерациите клони към безкрайност.

Също така в [Zlochin 2004] показват, че алгоритмите за оптимизация по метода на мравките могат да се представят като вариации на стохастичното спускане по градиент (*stochastic gradient descent*), крос-ентропията (*cross-entropy*) и алгоритъма за оценка на разпределяне (*estimation of distribution algorithm*).

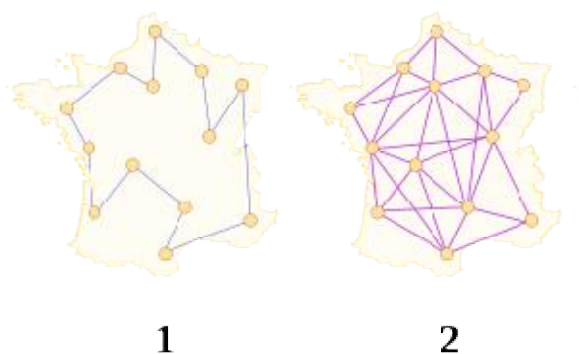
2.2.4 Някои приложения на метода на мравките

Алгоритмите за оптимизация по метода на мравките са прилагани към множество задачи за комбинаторна оптимизация. Задачите за комбинаторна оптимизация са интересни, защото често е доста по-лесно да се формулират и доста по-трудно да се решат (повечето от тях са от класа NP). Обикновено изискват неполиномиален брой изчисления. Повече информация е представена в следващата глава 3. Много производни на тях методи са адаптирани към динамични задачи с реални променливи, стохастични задачи, многоцелеви и паралелни приложения.

Първото приложение на метода на мравките е свързано със задачата за търговския пътник [Colomi 1991]. Първият алгоритъм от този клас, наречен AS е прилаган за решаване на тази задача, като целта е да се намери най-краткият маршрут за обхождане на множество от градове. Общият вид на алгоритъма е относително прост и базиран на множество изкуствени мравки, всяка от които извършва един от всички възможни обходи на градовете. На всяка итерация мравката избира да се придвижи от един град до друг в зависимост от следните правила:

1. Тя трябва да посети всеки град точно по веднъж

2. По-отдалечените градове имат по-малък шанс да бъдат избрани (проблема с видимостта)
3. Колкото по-интензивна е следата от феромон, положена върху пътя, свързващ два града, толкова по-голяма е вероятността този път да бъде избран
4. След всяка итерация следите от феромон се изпаряват частично
5. След приключване на обхода, мравката полага повече феромон по по-късите пътищата, по които е минала (количеството добавен феромон е обратно пропорционално на дължината на пътя).



Фигура 16. Задача за търговския пътник

Глава 3

Постановка на задачата

3.1. Комбинаторна оптимизация и техники за решаване на този клас задачи.

В комбинаторното оптимизиране често задачите имат голяма изчислителска сложност. Много от тези задачи изискват неполиномиален брой изчисления, т.е са от клас (NP-трудни). Когато се решава такава задача, трябва да се прецени добре каква степен на сложност има, за да се намери оптималното решение. За алгоритъм казваме, че решава задачата за полиномиално време, ако неговата времева сложност (брой изчисления) може да се изрази чрез полином. Ако алгоритъмът има времева сложност, която не може да бъде определена чрез полином, то такъв алгоритъм се нарича неполиномиален. Това включва сложност от вида $n^{\log n}$. Алгоритми с такава сложност се наричат още и суб-експоненциални. Суб-експоненциалните функции нарастват много по-бързо от която и да е полиномна. Задача, за която няма алгоритъм, решаващ задачата за полиномиално време се нарича неполиномиална задача (NP-трудна).

Теорията за NP-пълнотата е теория, която характеризира комбинаторното оптимизиране. Тази теория разделя комбинаторните оптимизационни задачи на два основни класа. Единият включва задачите, за които е известно, че могат да бъдат решени за полиномиално изчислително време клас P. В този случай се очаква в рамките на полиномиално време алгоритъмът да даде правилен отговор на задачата във вид ДА или НЕ. Вторият клас включва тези, които не могат да се изчислят за такова време. За този клас (NP) съществуващият алгоритъм трябва за полиномиално време да работи към всяка отделна размерност на задачата, за да определи дали отговор ДА е правилен. Формално класовете на сложност P и NP са определени на базата на идеалистични модели на системи за пресмятане, като „машината на Тюринг“. Ясно е, че $P \subseteq NP$, докато все още не може да се докаже дали $P = NP$ или не. Комбинаторните оптимизационни задачи обикновено се наричат задачи за търсене.

В изследването на теорията за NP пълнота важна роля играе редуцирането на времето до полиномиално. Това е процедура, при която една задача се преобразува до друга задача с помощта на алгоритъм, работещ за полиномиално време. Да приемем, че

имаме задача A , която може да се реши за полиномиално време и имаме задача B , която може да се трансформира до задача A чрез процедура за редуциране (свеждане) на времето до полиномиално време. В такъв случай, щом е възможно да извършим трансформацията на задачата за полиномиално време, то и решението на задача B , може да бъде намерено за полиномиално време. Приемаме, че дадена задача е от клас NP-трудни задачи, ако всяка друга задача от класа NP може да бъде трансформирана до нея чрез полиномиално редуциране на времето – чрез алгоритъм, който може да пресметне трансформирането в рамките на полиномиално време. Това предопределя класа NP-трудни задачи да са поне толкова трудни, колкото и задачите от клас NP. От друга страна, не е задължително NP трудните задачи да принадлежат и към класа на NP задачите. NP трудна задача, която принадлежи и на класа NP се нарича NP – пълна задача (complete). Ето защо задачите от клас NP –пълни, са известни като най-трудният клас задачи. Когато се намери алгоритъм, който решава задачата за полиномиално време, тогава всички задачи от клас NP- пълни, а следователно и тези от клас NP, ще могат да се решават за полиномиално време [Наков 2003].

3.2 Точни и приближени алгоритми.

При решаването на комбинаторни оптимизационни задачи се използват два типа (класове) алгоритми – точни и приближени (Approximate).

Точните алгоритми откриват оптимални решения и доказват своята ефективност за всякаква размерност на задачата, като пресмятат това за време, което се определя конкретно според обема на зададената размерност на задачата.

Ако трябва да се използва точен алгоритъм към клас задачи NP-трудни, то в най-лошия случай ще му бъде необходимо експоненциално количество време, за да достигне оптимално решение. Съществуват и примери, в които точни алгоритми са приспособени за решаване на някои конкретни задачи и са показали добри резултати. Въпреки това обаче, прилагането на точни алгоритми към повечето NP-трудни задачи изисква значителни изчислителни ресурси и е незадоволително от към изпълнение. Дори при задачи с относително малък размер, точните алгоритми, в много случаи, биха имали нужда от десетки или стотици часове процесорно време до достигане на оптимално решение. Ако едно оптимално решение не може да бъде достигнато по ефективен начин в практиката, то единствената възможност е да се размени

оптималност срещу ефективност. Казано по друг начин – гарантирането на намиране на оптимално решение може да бъде пожертвано за сметка на това, решението да бъде намерено за полиномиално време. При много задачи за вземане на решение в реално време може да се направи компромис с точността, когато е много важно времето, за което се намира решението.

Алгоритмите за приближение са конструирани така, че да търсят добро решение, което е близо до оптималното, като пресмятат това за сравнително ниска изчислителна мощ и без да гарантират оптималност на решението. Такива алгоритми за приближено пресмятане се наричат още евристики. Могат да се разделят на два типа – конструиращи и търсещи локално.

Конструиращите алгоритми генерират решения, като последователно добавят компоненти към първоначално празното решение (from scratch), докато цялостното решение бъде изградено. Въпреки че конструиращите алгоритми работят по-бързо от тези за локално търсене, качеството на намерените решения може да е по-лошо от това на локалното търсене.

Алгоритмите за локално търсене стартират работа от някакво първоначално решение и продължително се опитват да го подобрят чрез локални промени. Първа стъпка е установяване на структура на съседство над множество от кандидат-решения. За всяко междинно решение структурата на съседство определя множеството от възможни решения, към които алгоритъмът за локално търсене може да се насочи. В най-обикновен вид тези алгоритми са познати като алгоритми за итерационно подобряване, изкачване по хълм, спускане по градиент за комбинаторни оптимизационни задачи за търсене на максимум или минимум. Алгоритъмът за локално търсене работи, като търси в структурата на съседство на настоящото решение по-добри решения. Ако подобряващо решение бъде намерено, то измества досегашното решение и търсенето продължава. Тези стъпки се повтарят, докато няма намерено друго, подобряващо решение в структурата на съседство и алгоритъмът спира в локален оптимум. Известен недостатък на алгоритъма е, че може да спре при достигане на доста лош локален оптимум.

Задачата за построяване на БСМ е трудна от изчислителна гледна точка (*NP-трудна*) оптимизационна комбинаторна задача, която изисква експоненциално количество компютърни ресурси. Така наречените точни методи (exact methods) и традиционните числени методи се оказват недотам ефективни, за да се прилагат при такъв тип задачи (NP-трудни). Ето защо в такива случаи се прилага метаевристичен

метод. Най-често използваните метаевристични методи в комбинаторната оптимизация са еволюционното смятане (ЕС) и в частност генетичните алгоритми (ГА) [Holland 1975], симулиране на закаляване (simulated annealing) [Kirkpatrick 1983], метод на частиците [Kenedy 1995], метод на мравките [Dorigo 1992]. Съществуват и други евристични алгоритми вдъхновени от природата като метод на осите [Pilat 2006], метод на прилепите [Yang 2010], метод на пчелите [Pham 2005], метод на светулките [Yang 2008]. Много от съществуващите алгоритми за решаване на задачата за изграждане на БСМ идват от сферата на *еволюционното смятане* [Alba 2008], [Molina 2008].

Еволюционното смятане се е превърнало в термин за техники на решаване, чийто дизайн е заимстван от моделите на естествената еволюция на видовете. В исторически план съществуват три алгоритмични направления в областта на ЕС: еволюционни стратегии [Rechenberg 1973], [Schwefel 1981], еволюционно програмиране [Fogel 1966] и генетични алгоритми [Holland 1975] [Goldberg, 1989]. Общото между тези направления е в това, че използват популационно базирани алгоритми, включващи процедури, вдъхновени от популационната генетика, за да изследват дадено пространство за търсене. Такива процедури са репродукцията, мутацията и рекомбинацията. Процедурата по репродукция включва определянето на процеса на избор на онези индивиди, които следва да оцелеят и да бъдат включени в следващото поколение. Тази процедура използва пристрастие към тези индивиди, които дават висококачествено решение. Колкото по-висока стойност получава обектната функция от индивида, толкова по-вероятно е индивидът да бъде избран и да стане част от следващото поколение (генерация; популация). Процедурата по рекомбиниране (известно още и като кръстосване) комбинира части от два или повече индивида и генерира нови индивиди, наречени потомство. Процедурата за мутация е всъщност унарен оператор, който предоставя възможност за случайно модифициране на индивида.

Ще отбележим, че методът на мравките за решаване на комбинаторни оптимизационни задачи се базира на *конструиране на решението*, докато повечето други метаевристични методи са базирани на *усъвършенстване на намереното решение и се нуждаят от едно или повече начални решения*. Ето защо методът на мравките е подходящ за задачи със строги ограничения. Анализите показват, че методът на мравките е един от най-успешните метаевристични методи, който превъзхожда останалите за широк клас задачи [Dorigo 2004].

3.3 Проучвания относно проблема с позиционирането на сензорите в БСМ.

Проучванията относно позиционирането на сензорите при построяване на БСМ бележат значителен напредък през последното десетилетие. В [Zhang 2005] се изследва позиционирането на сензорите от гледна точка на предаването на данните. В [Yuce 2007] са изследвани различни правилни разпределения на сензорите във вид на квадрат, триъгълник и шестоъгълна мрежа. По сходен начин в [Kar 2003] са предложени систематични подходи за позициониране на точки в двумерно пространство, като при това се търси минималният брой сензори. При [Dhillon 2003] са предложени два жадни (greedy) алгоритъма, които избират позиции за сензорите в БСМ с минимален брой възли. Авторите използват вероятностен модел при избора на позиции за сензорите. Вероятността за покриване на която и да било точка от наблюдаваната площ от даден сензор намалява експоненциално с разстоянието от сензора.

Jourdan [Jourdan 2000] решава варианти на задачата, като използва многоцелеви генетичен алгоритъм. В неговата формулировка краен брой сензори трябва да бъдат разположени по начин, по който да се получи максимално покритие. При други изследвания [Wolf 2008] се взема под внимание количеството енергия на мрежата, като се използва еволюционен алгоритъм за този вариант на задачата. В [Hernandez 2011] е предложен ACO алгоритъм за вариант на задачата, но при тях е разгледан частен случай, когато сензорите са антени и се минимизира само енергията. В [Fidanova 2008], е предложено решение чрез алгоритъма на мравките, като под внимание е взет само броят на сензорите. В [Molina 2008], са предложени няколко еволюционни алгоритъма - NSGA II, IBEA, MOEA. MOEA е основен генетичен алгоритъм, който търси доминираните Pareto решения, като използва сортиране по недоминираност. Основната разлика е видът на функцията, която избира следващата популация. NSGA II използва функция за избиране на елитните индивиди (най-добрите биват избрани), докато MOEA използва механизъм, по който на всеки индивид се задава вероятност да бъде избран в зависимост от неговия ранг спрямо Pareto (по-висока стойност на ранга води до по-ниска вероятност). При [Konstantinidis 2010] е предложен генетичен алгоритъм, който достига сходни решения, както при [Молина 2008], но е тестван върху по-малък тестов модел. В [Younis 2008] авторите класифицират задачите за позиционирането на

сензорите в две категории: статични и динамични. В повечето от ранните разработки за задачата за БСМ се предполага, че сензорите не биха могли да се разположат по оптимален начин детерминистично и затова трябва да се използват стохастични подходи. При тези разработки авторите допускат някаква функция на разпределение и след това правят статистическа оценка. Примери за такъв подход са [Lazos 2006], [Brass 2007], [Cevher 2009], [Manohar 2009]. При други автори функцията на разпределение на сензорите може да се оптимизира, като тя се дефинира като параметрична функция [Wettergren 2009].

Друг използван подход е регулярно разпределение на сензорите, използвайки правоъгълна или шестоъгълна мрежа, като целта е да се използва минимален брой сензори за пълното покритие на областта [Kar 2003], [Jain 2005], [Bai 2006], [Biagioni 2003], но обикновено регулярният подход се прилага при по-прости задачи.

В [Zhang 2005] разглеждат позиционирането на сензори от гледна точка на предаването на данни. Разпределянето на сензорите така, че да се намали консумацията на енергия, е разглеждано в [Ganesan 2006]. Позициониране на сензори за покриване на периметър се разглежда в [Jourdan 2008] и [Lasos 2009], там целта е да се намери движещ се обект. В [Paschalidis 2009] се маркира множество от точки където евентуално биха могли да се позиционират сензорите.

3.4 Описание на задачата за изграждане на безжична сензорна мрежа.

В този раздел даваме описание на задачата за изграждане на БСМ. Ще представим формулировките, използвани при модела за решаването на задачата. Можем да обобщим по следния начин:

БСМ позволява наблюдение на някакво множество от физически параметри в пространство, наречено сензорно поле. Когато БСМ е изградена върху сензорното поле, всеки сензор наблюдава част от полето, като при идеални условия мрежата би следвало да може да наблюдава цялото сензорно поле, обединявайки всички части – наблюдавани от отделните сензори. Задача на дизайнера е да определи и установи сензорното поле, което чрез БСМ трябва да се наблюдава.

Пространството, което един самостоятелен сензор може да наблюдава, може да бъде моделирано под формата на кръг с радиус на покритие R_{sens} и радиус на

комуникация R_{com} . Радиусът на комуникация е обхватът на радиовръзката, в който е възможно установяване на комуникационна свързаност и предаване на данни. Стойностите на тези параметри зависят от средата, радиопредавателите, различните модели сензори и други.

При наблюдение на геоложки структури и размествания в тях средата предполага по-голям радиус на наблюдение (R_{sens}), тъй като сензорът може да засича нискочестотни вибрации, разпространяващи се на разстояние по-голямо, от колкото е обхватът на предавателя на сензора $R_{sens} > R_{com}$.

При сензорни мрежи в земеделието и агропроизводството сензорите могат да засичат локално параметри, като влажност на почвата, концентрация на вещества температура и др., които се изпращат за последваща обработка. При такива мрежи можем да имаме реален сценарий, където $R_{sens} < R_{com}$. Когато БСМ е разгърната върху сензорното поле, сензорите формират безжична ад-хок мрежа (мрежа от елементи, комуникиращи един с друг), на основата на която предават засечените данни до специален възел – ВЕКВ.

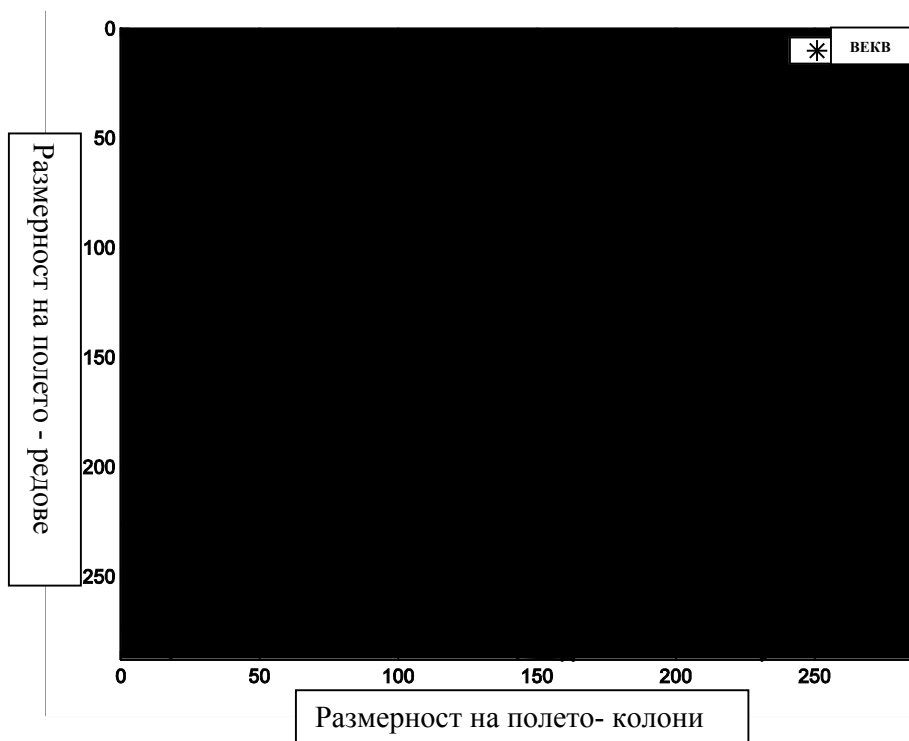
Всеки сензорен възел трябва да има връзка до ВЕКВ. Радиусът на комуникация често е по-малък от размера на мрежата и това предполага липса на директна връзка между ВЕКВ и сензорните възли, разположени в периферията на мрежата. При такъв сценарий се използва многостъпково маршрутизиране (multi-hop path), при което се установява връзка през други сензори за тези, които не достигат директно в обхвата си ВЕКВ. По този начин периферните сензорни възли предават засечената от тях информация на други възли, които имат връзка към ВЕКВ.

В тази точка на мрежата (ВЕКВ), информацията може да се обработва от процесора на ВЕКВ, да се предава за последваща обработка от друга система или да се предава към администратора чрез конкретен интерфейс.

Енергията на БСМ зависи от броя на трансмисиите (предаваните съобщения), които всеки сензор осъществява. БСМ събират информация на определени интервали (цикли). В един цикъл всеки сензор засича данните в своето поле, получава данни от по-отдалечените от ВЕКВ сензори и ги предава към по-близките до ВЕКВ сензори. Всеки сензор изпраща информацията под формата на пакети към тези свои съседи, които са най-близко до ВЕКВ или до самия ВЕКВ, ако той е в директен обхват. Ако съществуват няколко съседни сензори на разстояние с едно по-малко до ВЕКВ отколкото текущия, то съобщенията се разпределят между тях.

Така ако даден сензорен възел има n съседи на разстояние с едно по-малко до ВЕКВ, всеки от тях получава $1/n$ от съобщенията на въпросния сензор. Всеки сензорен възел консумира енергия, равна на единица, за да изпрати едно съобщение, съответстващо на предаването на засечените от сензора данни. Към това съобщение прибавяме и сумата на всички съобщения от сензорите, които са на по-голямо отстояние от ВЕКВ.

В разглежданата от нас задача се изисква пълно покритие на изследваната област. От друга страна, броят на сензорите трябва да бъде възможно най-нисък, тъй като повече сензори би означавало по-висока крайна цена при изграждане на мрежата, възможно е и по-високо влияние на околната среда и съобразяване с по-голям брой крайни позиции в полето. В сценарий на прикрито наблюдение това би довело и до по-голяма вероятност от разкриване и компрометиране. От друга страна, се изисква минимална консумация на енергия от мрежата. Това означава минимална цена за поддържане и експлоатация на мрежата. Понякога батериите с които работи мрежата, са скъпи, а понякога е скъпа тяхната подмяна, особено когато става дума за трудно достъпни терени като свлачища, вулкани, подводни обекти и др. Задачата, която решаваме, има две целеви функции, т.е. задачата е за многоцелева оптимизация. Тези функции са взаимно противоречащи си. Намаляването на броя сензори води до увеличаване на енергията на мрежата. От друга страна, за да се намали енергията на мрежата, обикновено се добавят сензори. Така ние се стремим да намерим баланс между броя сензори и консумираната енергия. Задачата за изграждане на БСМ е дефинирана като продължение на задачата за дизайн на радиомрежа. Вариант на задачата е решаван във [Fidanova 2010]. Там се цели постигане на максимално покритие с минимум сензори. Възможните позиции за поставяне на сензорите в този вариант на задачата са зададени като нареден списък, който да отговаря на спецификата на проблема. На фигура 17 е показано възможно решение, получено чрез поставяне на сензорите на случаен принцип. Позициите на сензорите са изобразени с черни точки на фигурата, с жълти кръгове е изобразена областта, която сензорът покрива, а с черни линии е показана свързаността на сензорите, кой сензор с кой комуникира директно. Със звезда е изобразена позицията на ВЕКВ. Ако дадена част се покрива от повече сензори, то тази част е в по-тъмно жълто.



Фигура 17 Разпределение на сензорните възли на случаен принцип.

Корените на многоцелевото оптимизиране откриваме в деветнадесети век, в разработките и изследванията на Edgeworth and Pareto в икономиката [Pareto 1896], [Mathur 1991].

Оптималното решение за многоцелеви оптимизационен проблем не е едно, както при едноцелевото оптимизиране. Тук решението е под формата на множество от решения, наречени –Pareto оптимални решения. Едно решение е Pareto оптимално ако не е възможно да се подобри един от компонентите, без влошаването на поне един от останалите компоненти [Mathur 1991]. Такова решение илюстрира множеството от компромисни решения между различните конфликтни цели. Главната цел при решаването на многоцелева оптимизационна задача е да се достигне Pareto оптимално множество от решения наричано още Pareto фронт [Mathur 1991].

Можем да представим формалната дефиниция на многоцелеви оптимизационен проблем по следния начин [Doyle 1985]:

Търсим :

вектор $\vec{x}^*=[x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$, който удовлетворява x^*

по отношение на ограничение $g_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m,$

и по отношение на ограничение $h_i(\vec{x}) = 0, i = 1, 2, \dots, p$

и минимизира векторната функция $\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$, където $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ е вектор на решаващите променливи (decision variables).

Множеството от всички стойности, удовлетворяващи ограничения определя областта на приемливите решения Ω , а всяка точка $\vec{x} \in \Omega$ е приемливо решение.

Дефиниция на Pareto оптималност. Точката $\vec{x} \in \Omega$ е оптимална по Pareto, ако за всяка точка $\vec{x} \in \Omega$ и $I = \{1, 2, \dots, k\}$, $\forall i \in I (f_i(\vec{x}) = (f_i(\vec{x}^*))$ или съществува поне едно $i \in I$, такова, че да доведе до $f_i(\vec{x}) > f_i(\vec{x}^*)$. По определението, $\vec{x}$ е оптимално по Pareto, ако не съществува друг вектор $\vec{x}$, такъв че ако бъде подобрен по отношение на един критерий, това да не води до влошаване по отношение на друг критерий.

Дефиниция на доминиране по Pareto: За вектор $\vec{u} = [u_1, \dots, u_k]$, казваме че доминира вектор $\vec{v} = [v_1, \dots, v_k]$ обозначен като $\vec{u} < \vec{v}$, тогава и само тогава, когато $\vec{u}$ е частично по-малко от $\vec{v}$. т.е. $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\} : u_i < v_i$.

Едно решение доминира друго, ако минимум един от компонентите му е по-добър от съответния компонент на другото решение и същевременно никой от останалите му компоненти не е по-лош от съответните на другото решение.

За дадена многоцелева оптимизационна задача: $\vec{f}(\vec{x})$, дефинираме оптималното множество по Pareto:

$$P^* = \{\vec{x} \in \Omega \mid \neg \exists \vec{x}' \in \Omega, \vec{f}(\vec{x}') < \vec{f}(\vec{x})\}.$$

За дадена многоцелева оптимизационна задача $\vec{f}(\vec{x})$ и нейното оптимално множество по Pareto P^* , Pareto фронтът се дефинира както следва: $PF^* = \{\vec{f}(\vec{x}), \vec{x} \in P^*\}$.

Pareto фронтът обхваща множеството от недоминираните решения. Когато мета евристиката се приложи, тогава целта се свежда до намирането на приближен Pareto фронт.

3.5 Най-добри резултати в литературата за разглежданата задача.

Най-добри резултати в литературата за разглежданата от нас задача за построяване на БСМ са постигнати от няколко еволюционни алгоритъма. Накратко те ще бъдат описани по-долу.

NSGA II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) - предложен в [Deb et al., 2002] като втори генетичен алгоритъм за сортиране по недоминираност, е многоцелева техника за решаване на основни задачи от области с висока изчислителна сложност на

сортирането по недоминираност, липса на елитизъм (подреждане според предварително зададен критерий) и нуждата от използване на споделени параметри. Авторите се справят с тези предизвикателства, като използват ускорено сортиране по недоминираност на базата на Елитна доминация по Pareto и метод за „изблъскване на разстоянието” Crowding distance method.

NSGA II е разработен като генетичен алгоритъм. Разликите между многоцелевия му вариант и едноцелевия е начинът на конструиране на целевата функция.

При NSGA II, решенията първоначално се сортират по отношение на ограниченията.

Приемливите решения идват първи, след това недобрите решения се сортират по възходяща степен на неудовлетвореност на ограниченията. Приемливите решения и всяко множество от решения със същата степен на неудовлетвореност се сортират по отношение на доминантност по Pareto. Това сортиране се прави чрез последователно извличане на множество от недоминирани решения (фронтове) от избрана суб-популация. Всички решения на този фронт получават еднаква стойност за ранг, като се задава оценка 0 за първия открит фронт, 1 за следващия открит фронт и така нататък. По този начин решенията могат да бъдат сортирани по техния ранг, започвайки от 0. Накрая решенията във всяка група с еднакъв ранг се сортират по отношение на стойността за „изблъскване на разстоянието”. Чрез този критерий на първо място са онези решения, чиито съседи са най-далечни и критерият същевременно е начин да се насърчава многообразието.

IBEA (Indicator-Based Evolutionary Algorithm) е предложен от [Zitzler и Kunzli 2004] Този еволюционен алгоритъм не използва процедура за сортиране по доминираност по Pareto. Тази функция тук е заместена от използването на показател за изпълнение I – Performance Indicator.

Този показател за изпълнение е двоичен и се използва за измерване и при сравнение на две множества от недоминирани решения. С неговото въвеждане задачата на многоцелевия алгоритъм може да се сведе до намиране на минимум за I , където I е функция от фронтът по Pareto и достигнатия фронт.

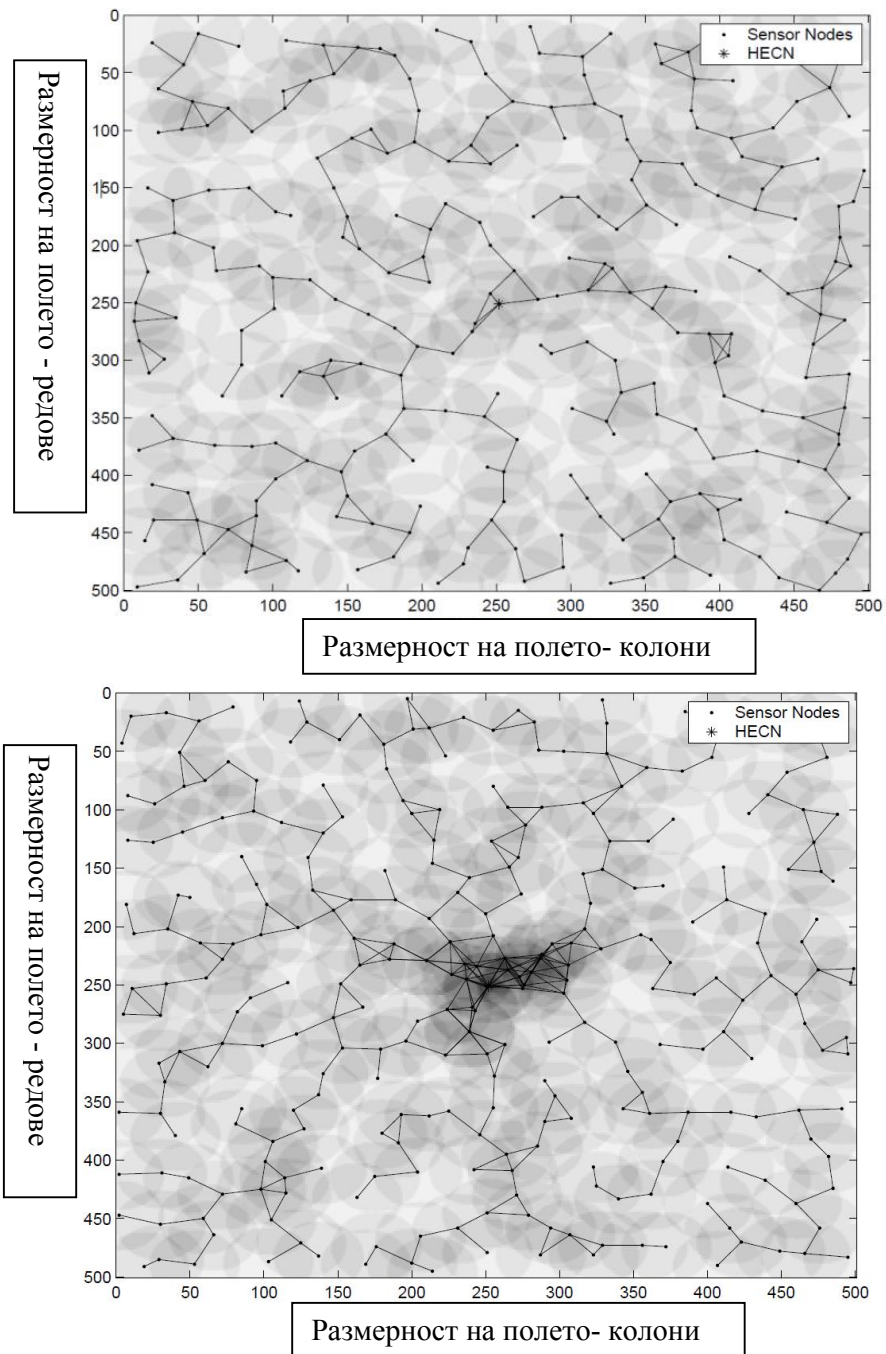
IBEA: е алгоритъм, който използва показател за сортирането на решенията в популацията. Когато показателят се използва, той не прави сравняване на множества с недоминирани решения, а сравнява единично решение с друго такова. В този смисъл на практика всяко решение от популацията е сравнявано с друго решение в популацията и резултатите от това се обединяват за определяне на самостоятелна стойност.

MOEA (Multi-Objective Evolutionary Algorithm) е основен генетичен алгоритъм, който търси доминираните Pareto решения, като използва подобно на NSGA II сортиране по недоминираност. Основната разлика е видът на функцията, която избира следващата популация. NSGA II използва функция за избиране на елитните индивиди (най-добрите биват избрани), докато MOEA използва механизъм по който на всеки индивид се задава вероятност да бъде избран в зависимост от неговия ранг спрямо Pareto (по-висока стойност на ранг води до по-ниска вероятност). Горепосочените алгоритми са описани подробно [Молина 2008].

В Таблица 1 са посочени параметрите, с които са използвани гореописаните еволюционни алгоритми.

Таблица 1 Използвани параметри при MOEA, NSGA II и IBEA

Параметри	MOEA	NSGAII	IBEA
Популация	100	100	100
Мутация	преместване	преместване	преместване
Степен на мутация	0.8	0.8	0.8
Степен на кръстосване	0.8	0.8	0.8



Фигура 18 (а, б). Решения постигнати с МОЕА

На фигура 18 са показани графично решения на задачата постигнати с алгоритъм МОЕА.

Глава 4

Едноцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки за построяване на безжична сензорна мрежа.

В тази глава предлагаме оптимизационен алгоритъм, който решава задачата, чрез прилагане на Метода на мравките. Резултатите, описани в тази глава, са публикувани в [Shindarov 2012], [Fidanova accepted]. Както беше описано в Глава 3, задачата има две целеви функции, броят на сензорите и използваната енергия от мрежата, които се стремим да минимизираме. Изискването за пълно покритие на наблюдаваната област и свързаността на мрежата приемаме за ограничение при построяване на алгоритъма.

Задачата е многоцелева по дефиниция. В предложения алгоритъм я превръщаме в едноцелева, като новата целева функция е резултат от комбинация на двете целеви функции в оригиналната задача.

Едни от най-важните моменти при прилагане на метода на мравките са:

- Избор на модел за представяне на задачата с граф
- Подходящ избор на това, къде ще се поставя феромонът, на върховете или на ребрата на графа
- Подходящо конструиране на евристичната информация.

Изборът влияе съществено на процеса на управление на мравките и конструираните от тях добри или близки до оптималните решения.

Графът, с който представяме нашата задача, представлява правоъгълна решетка. Сензорите ще бъдат поставяни във върховете на графа. При използването на метода на мравките има две възможности за поставяне на феромона: във върховете на графа; по ребрата на графа. Според нас в конкретния случай е по-подходящо феромонът да бъде поставян във върховете на графа. По този начин позициите, които са принадлежали на добри (недоминирани) решения, ще получат повече феромон и ще са по-желани на следваща итерация. За нашата задача решението ще бъде представено като дърво в графа. След като началната стойност на феромона е зададена, мравките започват да изграждат валидни решения, стартирайки от случайно избран връх. В нашия случай това е случаен връх, от който съществува директна връзка до БЕКВ.

След изграждане на решението стойностите за феромона се актуализират. В общия случай елементите на по-добрите решения получават повече феромон и така те са по-желани на следващата итерация.

На всяка стъпка мравката прави пресмятане на възможните ходове чрез вероятностно правило наречено *вероятност на прехода*, на базата на натрупания феромон и евристична информация, за да извърши обхождане.

Вероятността на прехода p_{ij} (Формула 1) да бъде избран връх j , когато текущият връх е връх i , е базирана на евристична информация η_{ij} и информация за количеството феромон τ_{ij} , съответстващо на този преход, където $i, j = 1, \dots, n$.

Колкото по-висока е стойността на концентрацията на феромона на даден връх, както и евристичната информация за него, толкова по-вероятно ще е той да бъде предпочетен за следващ ход от мравката. Феромонът изразява глобалната памет на мравките, техния опит да решат задачата при предишни итерации.

При стартиране на алгоритъма, началното ниво на феромона задаваме с положителна стойност τ_0 , като впоследствие мравките актуализират стойността, след като конструират решение [Bonabeau 1999].

В настоящото изследване използваме метода на мравките, като прилагаме система за изменение на концентрацията на феромона, включваща фиксирани горна и долна граница, съответно τ_{min} и τ_{max} - на стойността на концентрация или MAX-MIN Ant System изписвано още и като MMAS [Stutzle 2000]. Този вариант на метода е един от най-разпространените и успешните в практиката. Предимството в използване на фиксирани граници е възможността частично да се избегне прекалено натрупване на феромон във възли, които могат да принадлежат към няколко възможни решения и да доведе до повтаряне на ходове. Същевременно се избягва възможността някои възли да станат нежелани за обхождане от мравките поради изчерпване на феромонова концентрация. Още повече, както беше споменато в предходната глава, MMAS отговаря на условията на теоремата за сходимост (т. 2.2.3).

Задачата за изграждане на безжични сензорни мрежи е задача от клас NP-трудни многоцелеви оптимизационни задачи. В тази глава преобразуваме задачата до едноцелева. Практиката показва, че когато този похват се използва, задачата се опростява, но обикновено получените решения са по-лоши от случая, когато решаваме задачата като многоцелева, затова от решаващо значение е как ще бъде формирана новата целева функция при преобразуването.

Дефинираме новата целева функция както следва:

$$C(Vk) = \frac{F1(Vk)}{\max_i F1(Vi)} + \frac{F2(Vk)}{\max_i F2(Vi)} \quad (4)$$

Новата целева функция е комбинация от броя сензори и енергия на мрежата, за която търсим минималните стойности. Vk е решение, достигнато от мравка с поредност k , $F1(Vk)$ и $F2(Vk)$ са съответно броят на сензорите и количеството енергия, съответстващи на решението Vk , $i, k=1, \dots, \text{броят на мравките}$.

Съотнасянето на $F1$ към $\max_i F1(Vi)$ и на $F2$ към $\max_i F2(Vi)$ е нормализиране на намерените стойности за брой сензори и количество енергия по отношение на най-големите стойности, достигнати от някоя от мравките през първата итерация. По този начин, когато енергията и/или броят на сензорите намалява, стойността на обектната функция също намалява, а двата компонента запазват еднаквото си влияние.

С цел да избегнем насищането на пространството за търсене, диапазонът на възможни стойности на феромона за всяко отделно движение (всеки възможен ход на мравката) е ограничен в зададен интервал $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. τ_{max} е поставен да бъде асимптотичният максимум за τ_{ij} и

$$\tau_{max} = \frac{1}{(1-\rho)C(V^*)}, \quad (5)$$

докато $\tau_{min} = 0.087 \tau_{max}$. Това са ограниченията за феромона използвани в [Stutzle 2000]. Във формулата V^* е оптималното решение на задачата, но тъй като то е неизвестно, използваме V_{best} , което за нас е най-добрата достигната до момента стойност на целевата функция, вместо V^* .

За да намалим броя на изчисленията използваме втора правоъгълна решетка (граф). За модел на площта за покриване използваме мрежа $G=\{g_{ij}\}_{N \times M}$, където N и M е размерът на площта за сензорно покриване (дължина, ширина), а g_{ij} са върховете на графа. Благодарение на граф G пресмятаме покритието на терена. Въвеждаме нов граф $G1=N_1 \times M_1$, върховете на който отразяват позицията на сензорите, като $N_1 \leq N$ и $M_1 \leq M$. Параметрите N_1 и M_1 зависят от радиуса на покритие и радиуса на комуникация. По този начин намаляваме броя пресмятания, които алгоритъмът трябва да направи, а заедно с това и времето за обработка.

Количеството феромон се задава във вида:

$$Ph = \{ph_{ij}\}_{N1 \times M1}$$

като при инициализирането началната стойност се задава с малко положително число, например $1/n$ където n е броят на мравките

Всяка мравка започва да изгражда решение на задачата от случайно избран връх, от който съществува комуникация до ВЕКВ, като по този начин се осигурява различна стартова позиция за мравката при всяка итерация. Избора на следващ ход определяме чрез вероятност на прехода, според която се избира точка с най-голяма оценка за вероятност. Ако се достигне ситуация, при която повече от една точки имат равна стойност по отношение на вероятността, решението за избор между тях правим на случаен принцип.

Както вече беше споменато, мравката добавя следващите върхове в своето решение, като използва вероятност на прехода (Формула 1). Формулирането на евристичната информация е важна част от построяването на решенията. Необходимо е комбиниране на различни елементи от задачата по най-подходящ начин.

Един от приносите на тази работа е конструирането на подходящ евристичен елемент, чрез който можем да гарантираме намирането на валидни решения.

Предложената от нас евристична информация е произведение от три параметъра:

$$\eta_{ij}(t) = S_{ij} l_{ij}(1 - b_{ij}) \quad (6)$$

$$l_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ако съществува комуникация} \\ 0 & \text{ако не съществува комуникация} \end{cases}$$

$l_{ij}=1$ ако от избраната позиция (i,j) съществува директна комуникация с поне един от останалите сензори от мрежата, или 0 – ако не съществува.

S_{ij} , е броят на точките, които сензор (i,j) ще покрие и които все още не са покрити от друг сензор.

b – е матрица на решенията, в която елемент $b_{ij}=1$, когато има поставен сензор на този връх (i,j) в графа GI . В противен случай $b_{ij}=0$.

С помощта на S_{ij} се опитваме локално да увеличим покритието на точките, като по този начин очакваме, че наличието на повече нови покрити точки ще доведе съответно до по-малък брой сензори при изграждане на БСМ. l_{ij} от своя страна гарантира, че всички сензори ще имат комуникационна свързаност. Чрез правилото $(1 - b_{ij})$ гарантираме, че възможната позиция на сензора все още не е заета и няма вече поставен сензор, както и че във всеки един от върховете на граф GI ще бъде поставен не повече от един сензор.

Когато вероятността за преход $p_{ij}=0$ за всички стойности на i и j - търсенето спира. По този начин търсенето се преустановява, ако няма повече свободни позиции или ако всички точки вече са покрити.

Чрез настоящото изследване ще направим опит да допринесем за подобряване на резултатите, постигнати от другите метавристички за решаване на задачата за изграждане на безжични сензорни мрежи. Нашата цел е да предложим ефикасен алгоритъм на базата на метода на мравките за решаване на задачата, сравнявайки се с най-добрите резултати, намерени в литературата, и прилагайки нашият алгоритъм към техния тестови пример. Искаме да решим по нов, гъвкав начин задачата, така че броят и позициите на сензорите да могат да бъдат избирани при гарантирано пълно покритие на сензорното поле, като търсим енергийна ефективност и минимална цена на мрежата.

В допълнение на това, нашият интерес е насочен към преодоляването на сложни примери, в които размерността на безжичните сензорни мрежи е в същия порядък, както при реална мрежа, изградена от няколкостотин възела. Създали сме компютърна програма, реализираща нашия алгоритъм. В нашата програма полето, в което ще се разполага мрежата, е правоъгълно, като неговите размери са входни параметри. Точката, в която е фиксиран БЕКВ е входен параметър и може да се намира на произволно място в полето. Радиусите на покритие и комуникация са също входни параметри. Сензорите са еднотипни, а радиусът на комуникация може да бъде различен от радиусът на покритие.

Когато ни интересува само покритието (например когато мрежата не е безжична), тогава е достатъчно да поставим стойността на радиуса на комуникация да бъде повече от два пъти по-голям от радиуса на покритие. Така, за да се гарантира пълното покритие на наблюдаваната област, всеки сензор ще е на разстояние по-малко от два пъти радиуса на покритие от най-близките си сензори и радиусът на комуникация ще бъде пренебрегнат. В нашата програма допускаме наличието на правоъгълни препятствия, непроницаеми за сензорите. Чрез тях могат да се моделират полета с форма, различна от правоъгълната.

Таблица 2 Параметри на тестовия пример

Параметри на задачата:	стойност
площ	500×500
радиус на покритие R_{sens}	30
радиус на комуникация R_{com}	30

В Таблица 2 са посочени параметрите на тестовия пример, който използваме. С цел да сравним постигнатите от нас решения с известни до момента решения на задачата, използваме тестови пример, представен в [Molina 2008]. Работили сме с площ с размерност 500×500 точки, която трябва да бъде покрита със сензори, чийто комуникационен и сензорен радиус е 30 точки. При този пример ВЕКВ е фиксиран в центъра на площта.

Теренът има площ от 250,000 точки и всеки сензор покрива кръгова площ от 2,827 точки. При идеални условия това предполага пълно покритие от 89 сензора. Постигането на тези идеални условия не е възможно, тъй като това би предполагало, че при покриването няма застъпване на покритието на един сензор с това от друг, а това не е възможно поради физическите характеристики на радиоразпръскването – геометрично можем да го представим като кръг с радиус 30 точки. Ето защо очакваният минимален брой сензори, който е нужен за постигане на пълно покритие, е по-голям от 89. В този пример граф G съдържа 500×500 върха.

Когато прилагаме оптимизиране по метода на мравките към този пример, граф $G1$ съдържа 50×50 върха, които са 100 пъти по-малко от върховете в граф G . Броят на върховете в графа $G1$ е пропорционален на броя на върховете в графа G и е пропорционален на броя на покритите точки от радиусите на комуникация и покритие. По този начин върховете на графа $G1$ са подмножество на върхове на графа G и радиусите на покритие и комуникация покриват 3 точки от графа $G1$. Пробвали сме броят на върховете на $G1$ да не е пропорционален на G и на радиусите на покритие и комуникация, но тогава се влошава полученият резултат. За конкретния пример сме пробвали с граф $G1$ при който броят на върховете е 25 пъти по-малък от този на граф G . В този случай се увеличава времето за изпълнение на една итерация поради увеличения брой изчисления, а качеството на постигнатите решения остава същото.

Пример за решение, което постига пълно покритие и свързаност на мрежата, е квадратна мрежа, формирана от сензори, разделени на разстояние от 30 точки. Стартирайки от ВЕКВ, 250 точки трябва да бъдат покрити по всяка страна на терена с

помощта на 8 сензора. Ето защо теренът има 17, $(8+8+1)$ редове и 17 колони, като това са 289 сензори, включвайки ВЕКВ.

При това симетрично разполагане имаме 4 сензора, които са директно свързани с ВЕКВ така, че пълният трафик на мрежата от 288 съобщения за един цикъл е равно разпределен помежду им. В резултат на това, най-високо натоварените сензори биха имали натоварване от 72 съобщения. Това възможно решение достига стойности (288, 72), като първото число в наредената двойка отговаря на броя сензори, а второто на използваната енергия. Това решение се получава, без да ни е необходим никакъв алгоритъм. То ще ни служи за сравнение, доколко са добри получените от нас решения.

След няколко последователни пускания на алгоритъма определяме подходящите стойности на параметрите, участващи в управлението на алгоритъма (Таблица 3). Използваха се малко на брой мравки, само 4, и малко на брой итерации, само 8, защото задачата е с голяма изчислителна сложност и на една мравка, за да построи едно решение (една итерация) са и необходими 3 минути независимо, че програмата е пускана на най-мощните компютри от грид инфраструктурата на Института по информационни и комуникационни технологии. Това означава, че едно пускане на програмата с 4 мравки за 8 итерации отнема 1ч 36 мин.

За сравнение еволюционните алгоритми цитирани по-долу, използват популация от 100 индивида и програмите са вървели в продължение на 10 ч на сходни компютри, за да постигнат цитираните резултати (информацията за видовете компютри и времето за работа е получена след личен контакт с авторите на алгоритмите).

Таблица 3. Параметри на алгоритъма

Параметър	Стойност
Брой на мравките	4
Итерации	8
ρ	0.5
α	1
β	1

Методът на мравките е стохастичен и затова са направени 30 независими пускания на алгоритъма. Недоминираните решения, намерени от нашия алгоритъм на

мравките, който ще наричаме ACO-mono, са: (238, 50), (233, 56), (229, 57), (228, 58) и (226, 60).

Таблица 4 Сравнение на едноцелевия вариант с други алгоритми

Алгоритъм	Мин. сензори	Мин. енергия
Symmetric	(288,72)	(288,72)
MOEA	(260, 123)	(291,36)
NSGA-II	(262,83)	(277,41)
IBEA _{ND}	(265,83)	(275,41)
ACO-mono	(226,60)	(238,50)

В Таблица 4 са представени най-добрите намерени решения по отношение броя на сензорите и по отношение на консумираната енергия, достигнати от няколко метаевристични метода. Ние сравняваме резултатите от нашия алгоритъм (ACO-mono) с резултатите, достигнати от еволюционни алгоритми и с резултатите от симетричното решение [Molina 2008]. Правим сравнението по този начин, защото така е направено в [Molina 2008]. Тези еволюционни алгоритми са конструирани като многоцелеви и търсят недоминирани решения.

Достигнатите от ACO-mono решения за броя на сензорите са в интервала [226, 247]. По този начин най-лошият брой сензори, достигнат от алгоритъма на мравките, е по-малък от най-доброто, достигнато от останалите споменати алгоритми. Всяко от недоминираните решения на ACO-mono доминира симетричното решение, което означава, че сме получили добри решения. Нека сравним получените решения с най-малък брой сензори. Решенията, получени от споменатите еволюционни алгоритми, имат много висока енергия, по-висока от тази на симетричното решение. Това означава, че те не доминират симетричното решение, тоест не са добри решения.

Решението на алгоритъма на мравките с минимален брой сензори доминира останалите решения с минимум сензори, както и симетричното решение – това показва, че достигаме добри решения.

Сравнявайки резултатите от гледна точка на решения с най-ниска енергия, MOEA намира решение с доста ниска енергия, но за сметка на това с голям брой сензори, по-голям от този на симетричното решение. Така това не е добро решение.

Другите два еволюционни алгоритъма (IBEA и NSGAI) намират решения с по-малко енергия от симетричното решение и малко по-малък брой сензори. Тези решения също са добри.

И в този случай решенията, намерени от алгоритъма на мравките, доминират симетричното решение. Енергията в тези решения е малко повече от тази, намерена от еволюционните алгоритми, но броят на сензорите е доста по-малък.

Искаме да отбележим, че споменатите еволюционни алгоритми намират горните решения като многоцелеви, докато нашият алгоритъм работи като едноцелеви. MOEA намира решение с енергия само 36 като използва допълнителна процедура за подобряване на решението. От всичко това можем да заключим, че нашият алгоритъм работи добре и че сме конструирали по подходящ начин целевата функция и евристичната информация.

Ще сравним получените от нас решения с тези, получени в [Fidanova 2012]. Там задачата също е сведена до едноцелева и също се използва алгоритъм на основата на метода на мравките, но целевата функция представлява произведение от броя на сензорите и енергията на мрежата.

Таблица 5. Сравнение между два ACO алгоритъма

Алгоритъм	Мин. Сензори	Мин. енергия
[Fidanova 2012]	(233,59)	(239,58)
ACO-mono	(226,60)	(238,50)

Сравнявайки двата алгоритъма, виждаме, че когато целевата функция е *сума* от броя на сензорите и енергията на мрежата постигаме решение с по-малко на брой сензори, както и решение с по-малка енергия, отколкото в случая на умножение на броя на сензорите и енергията. Когато целевата функция е *сума* от броя на сензорите и енергията, множеството от недоминираните решения се състои от 6 решения, докато в случая на умножение се състои само от две. Всичко това показва, че при трансформирането на задачата от многоцелева към едноцелева е по-подходящо двете целеви функции на първоначалната задача да бъдат сумирани, отколкото умножени.

Глава 5

Едноцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на теглови коефициенти за построяване на безжична сензорна мрежа.

В тази глава отново свеждаме задачата от многоцелеве до едноцелева. В този случай въвеждаме теглови коефициенти в целевата функция. Целта е да изследваме влиянието на тегловете коефициенти върху качеството на намерените решения. Резултатите, описани в тази глава, са публикувани във [Fidanova 2012a].

Постановката на решаваната задача е същата като в Глава 4. За разлика от задачата, решена в Глава 4, тук дефинираме целевата функция, както:

$$C(V_k) = \lambda \frac{F1(V_k)}{\max_i F1(V_i)} + (1 - \lambda) \frac{F2(V_k)}{\max_i F2(V_i)}, \quad (7)$$

където V_k е решение, достигнато от мравка с поредност k , а $F1(V_k)$ и $F2(V_k)$ са съответно броят на сензорите и количеството енергия, съответстващи на решението (V_k).

Делим стойността на $F1$ на $\max_i F1(V_i)$ и на $F2$ на $\max_i F2(V_i)$ за нормиране на намерените стойности за брой сензори и количество енергия. Параметърът λ показва влиянието на целевите функции $F1$ и $F2$, в новата целева функция след преобразуването.

Цел на настоящото изследване е да установим въздействието на параметъра λ върху качеството на получените решения и при коя негова стойност решенията са най-добри. Отново работим с тестовия пример от предходната глава. Целта ни е да можем да сравняваме постигнатите от нашия алгоритъм резултати, с тези на други автори. Управляващите параметри на нашия алгоритъм са същите като в предходната глава (виж. Таблица 3), за да можем да правим сравнение с постигнатите там резултати. Всички тестове са пускани при еднакви условия за да можем да сравняваме резултатите от различните глави на тази дисертация.

Алгоритъмът е пускан по 30 пъти с този тестови пример с различни стойности на параметъра λ . λ заема стойности от следното множество: $\{0.125, 0.250, 0.375, 0.500, 0.625, 0.750, 0.875\}$. В случая, когато $\lambda=0.500$, двете целеви функции са с еднаква тежест в целевата функция на едноцелевата задача или имаме случая, разгледан в предходната глава.

Таблица 6. Недоминирани решения:

λ					
0.125	(238,49)	(235,51)	(229,58)	(227,60)	
0.250	(238,49)	(235,51)	(228,58)		
0.375	(238,49)	(235,51)	(229,57)	(227,58)	(226,60)
0.500	(238,50)	(233,56)	(229,57)	(228,58)	(226,60)
0.625	(238,49)	(235,51)	(229,57)	(227,58)	(226,60)
0.750	(238,49)	(235,51)	(229,57)	(227,58)	(226,60)
0.875	(238,49)	(230,51)	(225,57)		

В Таблица 6 са показани недоминираните решения, намерени при различните стойности на параметъра λ след 30 пускания с всяка от стойностите му. От таблицата се вижда, че според получените решения най-добрата стойност за λ е $\lambda = 0.875$, защото при тази стойност алгоритъмът намира решения, които доминират решенията, намерени при другите стойности за λ . Ще наричаме този алгоритъм АСО- λ . Така решенията, намерени от АСО- λ , доминират решенията, намерени от АСО-mono. При тази стойност на λ се дава превес на броя на сензорите в целевата функция. Недоминираните решения намерени при $\lambda = 0.875$ са 3. В две от тях се намалява броят на сензорите спрямо недоминираните решения намерени от останалите алгоритми, а в едното се намалява и енергията. В третото недоминирано решение енергията е с 1 по-малка или равна на, на съответните недоминирани решения при другите стойности на λ , при същата стойност за броя на сензорите. При всичките пускания на алгоритъма независимо от стойността на λ , броят на сензорите е бил в интервала [225,247]. Отново ще покажем, както в предходната глава, че нашият алгоритъм постига много добри решения сравнен със симетричното решение и с други алгоритми, срещани в литературата [Molina 2008].

Таблица 7. Решения за БСМ

Алгоритъм	Мин. сензори	Мин. енергия
Symmetric	(288,72)	(288,72)
MOEA	(260,123)	(291,36)
NSGA-II	(262,83)	(277,41)
IBEA	(265,83)	(275,41)
ACO-mono	(226,60)	(238,49)
ACO- λ	(225,57)	(238,49)

Отново най-лошият брой сензори, достигнат от алгоритма на мравките, представен в тази глава, е по-малък от най-доброто достигнато от останалите споменати алгоритми.

Всички недоминирани решения на алгоритма на мравките доминират симетричното решение.

Нека сравним получените решения по признака с най-малък брой сензори. Установяваме, че решенията получени от споменатите еволюционни алгоритми, имат много висока енергия в сравнение със симетричното решение.

Решението на алгоритма на мравките с минимален брой сензори доминира останалите решения с минимум сензори, както и симетричното решение – това показва, че е добро решение.

Стойностите за енергията намерени от АСО-λ (Таблица 7), е малко повече в сравнение с тази, намерена от еволюционните алгоритми, но броят на сензорите е доста по-малък. Както и в предишната глава, можем да заключим, че нашият алгоритъм (АСО-λ) постига много добри резултати. Още повече поради малкия брой мравки и малкото използвани итерации, нашият алгоритъм използва по-малко компютърни ресурси като време и памет от цитираните еволюционни алгоритми. Можем да заключим, че алгоритъмът АСО-λ превъзхожда известните дотук други алгоритми за решаване на поставената задача (тестови пример от 500×500)

Глава 6

Многоцелеви вариант на алгоритъма за оптимизиране с използване на колония от мравки, за построяване на безжична сензорна мрежа.

В предходните две глави представихме конструирането на алгоритъма на мравките, изследвахме влиянието на теглови коефициенти при преобразуването на задачата от многоцелева към едноцелева и отношението им към получените резултати. Сравнихме получените резултати с други известни резултати, познати ни от литературата, за същата задача, решавана в настоящото изследване.

В тази глава ще предложим многокритериален ACO алгоритъм за решаване на задачата за изграждане на БСМ.

И в тази глава, както в предходните две, прилагаме MAX-MIN Ant System. За тази модификация на метода на мравките (MAX-MIN) е характерно, че има долна и горна граница на количеството феромон, както и че само мравката, построила най-доброто решение, поставя феромон. Този метод е разработван за решаване на еднокритериални оптимизационни задачи. При настоящото прилагане на метода променяме този модел. Ще дадем възможност за актуализиране на феромоновите стойности на тези мравки, които са намерили недоминирани решения. По този начин алгоритъмът става по-гъвкав към многоцелевата оптимизация, която изследваме в настоящия дисертационен труд. С добавяне на феромон на върховете на недоминираните решения целим да увеличим влиянието на онези решения, които са част от най-добрите, достигнати до момента решения.

Правилото, с което дефинираме актуализирането на феромоновата следа задаваме като:

$$\tau_{ij} \leftarrow \rho \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}, \quad (8)$$

Където

$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{F(k)} \text{ ако } (i, j) \in \{\text{не доминирани решения,} \\ \text{достигнати от мравка с поредност } k.\} \\ 0 & \text{в противен случай} \end{cases}$$

$F(k)$ е оценъчна функция за решенията, достигнати от мравка с поредност k , а $i, j = 1, \dots, n$, $\rho \in [0, 1]$ – и симулира изпарението на феромона в природата. Чрез параметъра ρ намаляваме влиянието на старата информация, запазвайки я на едно определено ниво.

Разликата с предходните глави, в които решаваме задачата като едноцелева, е, че във формулата за феромона на мястото на целевата функция използваме оценъчна функция, защото в този случай имаме две целеви функции. Важно е как ще бъде подбрана оценъчната функция, защото тя е съществена при управлението на мравките за намиране на добри решения.

Оценъчната функция се използва, за да се определи качеството на решението. Целта е да се заложи повече феромон на недоминираните решения и по този начин мравките да бъдат насърчавани да търсят около тях за нови недоминирани решения. За оценъчна функция използваме целевата функция от АСО-моно (Формула 3). Нашата оценъчна функция е динамична и отразява моментното състояние на решението.

С цел да избегнем насищането на пространството за търсене, диапазонът на възможни стойности на феромона за всяко отделно движение (всеки възможен ход на мравката) е идентичен с използвания в предходните глави, ограничен в зададен интервал $[\tau_{min} \text{ и } \tau_{max}]$. Използваната в тази глава евристична информация е същата като в предходните две глави (Формула 6).

В края на всяка итерация се обновява множеството от недоминирани решения, като се добавят нови недоминирани, ако са намерени такива, а някои от решенията в това множество отпадат, ако новите ги доминират.

В тази глава ще използваме същия тестови пример, както в предходните две.

Всяка мравка изгражда решението от случайно избран връх, от който съществува комуникация до ВЕКВ, като по този начин осигуряваме различна стартова позиция за всяка следваща мравка при всяка итерация. Избора на следващ ход определяме чрез вероятностно правило, вероятност на прехода, според което се избира точка с най-голяма оценка за вероятност. Ако алгоритъмът достигне ситуация, при която повече от една точки имат равна стойност по отношение на вероятността – решението за избор между тях правим на случаен принцип.

Описаният по-горе алгоритъм е реализиран от програмен код, написан на езика C++, като тестовете са направени на компютър с Intel Pentium процесор с честота 2.8 GHz. Софтуерът може да реши задачата спрямо всякаква правоъгълна площ, като радиусът на покритие може да бъде различен от радиуса на комуникация и може да приема всякаква положителна стойност. След няколко последователни пускания на

алгоритъма определяме подходящите стойности на управляващите параметри на алгоритъма.

Таблица 8. Параметри на многоцелевия алгоритъм:

Параметър	Стойност
Брой на мравките	4
Итерации	8
ρ	0.5
α	1
β	1

В Таблица 9 са показани резултатите от най-добрите намерени решения за броя на сензорите и енергията на мрежата, намерени от няколко метаевристични алгоритми. Ще сравним получените в тази глава резултати и с резултатите АСО- λ и със симетричното решение.

От статистическа гледна точка се налага минималният брой пускания на алгоритъма да бъде 30 пъти. След 30 независими пускания на алгоритъма достигнатите решения за брой сензори са в интервала [226, 247]. Виждаме, че най-лошото решение за брой сензори на многоцелевият алгоритъм на мравките е с доста по-малък брой сензори от най-добрите решения на останалите алгоритми. Недоминираните решения, намерени от алгоритъма, са $\{(238, 50), (237, 53), (236, 55), (233, 56), (225, 57)\}$. Всички недоминирани решения на многоцелевият вариант на алгоритъма доминират симетричното решение.

Да сравним получените резултати за минимален брой сензори. Получените резултати от останалите еволюционни алгоритми достигат решения с по-малък брой сензори от симетричното решение, но енергията в тези решения е доста висока в сравнение с тази на симетричното решение, следователно това не са добри решения. Решенията на многоцелевия вариант на алгоритъма на мравките доминират решенията на другите алгоритми по отношение на броя сензори, така неговите решения са добри решения.

Да сравним достигнатите решения по отношение на енергията на мрежата. МОЕА алгоритъмът може да разположи сензорите така, че да покрият зададената площ с доста ниска енергия, но за сметка на това броят на сензорите е твърде висок и е по-

голям от броя на сензорите в симетричното решение, затова то не е добро решение. Още повече тази ниска енергия е постигната с допълнително поставяне на сензори в близост на ВЕКВ. Останалите два еволюционни алгоритъма също достигат решения с по-малко енергия от енергията при симетричното решение и в същото време броят на сензорите е малко по-малък от този на симетричното и така те са нелоши решения.

Решенията на многоцелевия вариант на алгоритъма на мравките доминират симетричното решение. Достигнатата енергия е малко повече от тази на еволюционните алгоритми, като в същото време броят на сензорите е доста по-малък. Можем да отчетем, че резултатите са добри, както и че нашите резултати са постигнати, след като програмата е работила в продължение на един час и половина на компютър, сходен с компютрите, на които са пускани цитираните еволюционни алгоритми. Така получените от нас резултати са постигнати с използване на по-малко компютърни ресурси като време и памет, което не е маловажно, особено когато се решават задачи с голяма изчислителна сложност.

Когато решаваме задачата като многоцелева, достигахме сходни резултати като качество в сравнение с резултатите, които получаваме при преобразуване на задачата към едноцелева, но Pareto фронтът съдържа повече точки.

Таблица 9 Сравнение на резултатите от различни алгоритми

алгоритъм	Symmetric	MOEA	NSGA-II	IBEA HD	ACO- λ	ACO-multi
Минимум сензори	(288, 72)	(260, 123)	(262, 83)	(265, 83)	(225, 57)	(225, 57)
Минимум енергия	(288, 72)	(291, 36)	(277, 41)	(275, 41)	(238, 49)	(238,50)

Ще използваме хиперобем (hyper volume) [Durillo 2011] като индикатор за качеството на достигнатите решения. Математически за всяко решение се конструира хиперкуб с указател W и решението, като диагонални ъгли на хиперкуба. Указателят може лесно да бъде намерен чрез конструирание на вектор на най-лошите стойности на целевата функция. Следователно търсим обединение на всички хиперкубове и намираме съответният хиперобем. Алгоритмите с големи стойности за хиперобем са предпочитани в практиката.

Таблица 10 показва основният хиперобем от фронтите, достигнати от различните алгоритми. Ние използваме хиперобем метриката, за да съпоставим решенията, намерени от различните алгоритми. При алгоритъма на мравките

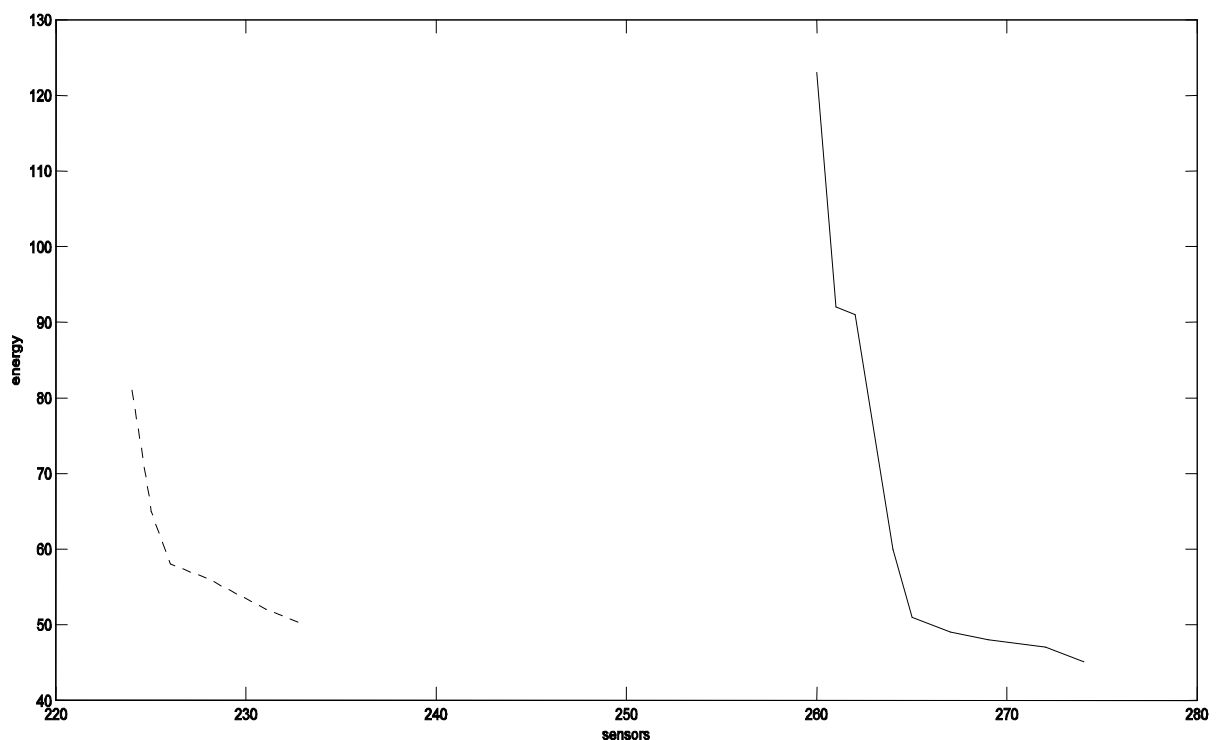
хиперобемът достига по-високи стойности в сравнение с останалите алгоритми. От статистическа гледна точка трите генетични алгоритъма достигат приблизително еднакви стойности за хиперобема.

Минималният хиперобем достигнат от алгоритъма на мравките е сходен с максималния хиперобем при останалите алгоритми.

Таблица 10 Сравнение на хиперобема

Алгоритъм	Среден хиперобем	Макс. хиперобем	Мин. хиперобем
MOEA	0.7388	0.7847	-
NSGA II	0.7306	0.7868	-
IBEA	0.7280	0.7704	-
ACO- multi	0.9440	0.9900	0.7769

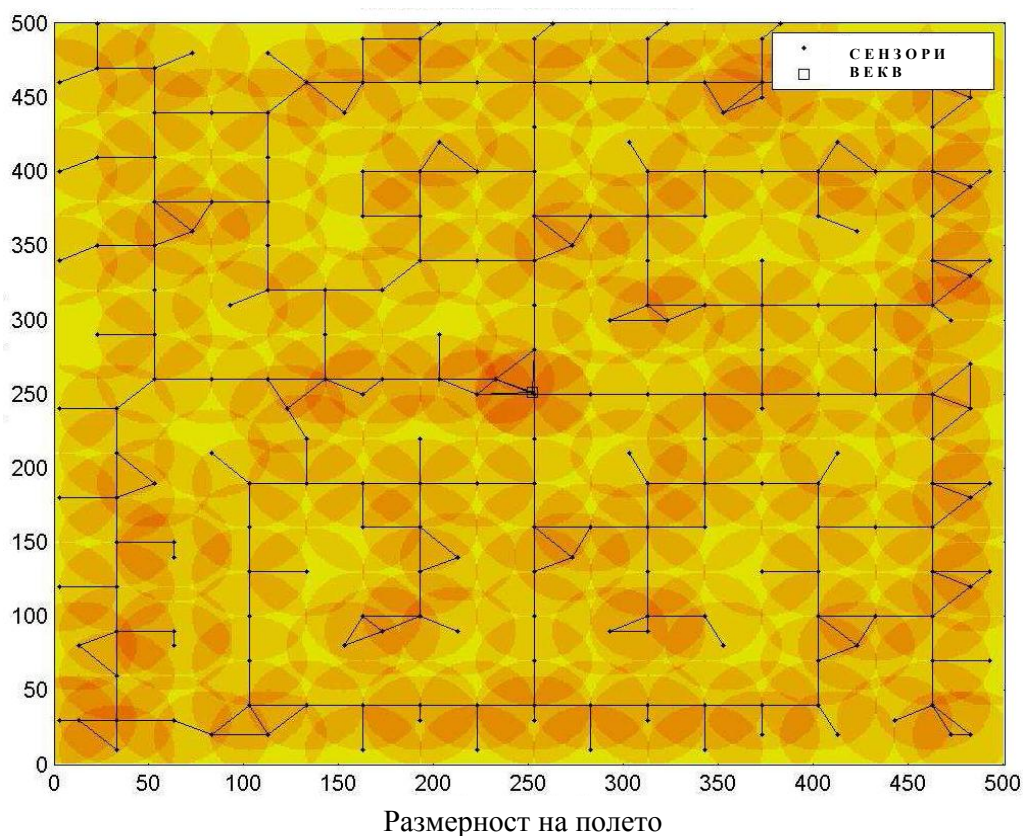
По този начин, позовавайки се на критерия за хиперобем, можем да кажем, че нашият алгоритъм дава по-добри резултати в сравнение с останалите три алгоритъма.



Фигура 19. ACO Pareto фронт и MOEA Pareto фронт

На фигура 19 с прекъсната линия е показан Pareto фронтът, получен с алгоритъма на мравките, а с непрекъсната линия е Pareto фронтът, получен от МОЕА. Ясно се вижда, че решенията получени с алгоритъма на мравките, силно доминират тези, получени с МОЕА, което още веднъж показва превъзходството на нашия алгоритъм.

Карта на позициите на сензорите:



Фигура 20. Решение, постигнато с АСО

На фигура 20 е представено решение, постигнато с метода на мравките. Кръговете показват областта на покритие на всеки един от сензорите, точките показват позициите на сензорите, а линиите, които ги свързват, изобразяват комуникацията. Вижда се, че има пълно покритие на областта и свързаност на мрежата. Някои части от областта се покриват от повече от един сензор.

Заклучение и обобщение на резултатите от изследването.

Дисертационният труд включва изследване на задачата за построяване на безжична сензорна мрежа с минимален брой сензори и минимална консумация на енергия, което съответства на минимална цена за изграждане и минимална експлоатационна цена. За решаване на задачата е приложен методът на мравките.

Задачата е двукритериална. Тя е сведена до еднокритериална, като се сумират двете целеви функции. Направено е сравнение с АСО алгоритъм за същата задача, в който тя е сведена до еднокритериална чрез умножение на двете целеви функции. Показано е, че предложеният в дисертацията вариант постига по-добри решения. В дисертацията е предложен и АСО алгоритъм, в който задачата е сведена до едноцелева, като се използват теглови коефициенти. Изследвано е влиянието на тегловите коефициенти върху поведението на алгоритъма и качеството на постигнатите решения.

Предложен е и АСО алгоритъм, решаващ задачата като многокритериална. Направено е сравнение между предложените в дисертацията алгоритми, както и с най-добрите резултати за разглежданата задача, намерени в литературат. Показано е, че разработените в дисертацията алгоритми превъзхождат тези, предложени от други учени.

Заслужава да се отбележи, че предложените варианти на алгоритъма на мравките са реализирани на C++, заедно с това към дисертацията е приложено описание на приложението на C++. С програмата в модела лесно могат да се въведат координати на различни двумерни (тримерни) ограничения в сензорно поле със зададена размерност и да се намерят оптималните позиции на сензорите. Програмата дава възможност за различни стойности за радиус на покритие и радиус на комуникация с цел максимална симулация на реални условия.

Авторът се надява, че с изследванията си е дал своя принос към популяризирането на един природен феномен (груповата интелигентност на мравките), с оглед неговото моделиране и решаването на конкретна математическа задача. Резултатите, представени в настоящия дисертационен труд, са вдъхновени от необятното многообразие на идеи за алгоритми в заобикалящия ни свят. Моделите на поведение не само при мравките, но и при птичите ята, рибните пасажии и други живи организми са само част от природното многообразие, към което авторът се надява да е открил широко поле за изследователска дейност за тези, които проявят интерес към неговите резултати.

Списък на публикациите свързани с дисертацията

1. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Optimal Sensor Layout Using Multi-Objective Metaheuristic, In Proc. Of Int. Conf. of Information Systems and Grid Technologies, Sofia, Bulgaria, 2011, 114 – 122.
2. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Mono-objective Algorithm for Wireless Sensor Layout, In Proc. Of OMKO-NET Int. Conference, Southampton, UK, 2012a, 57 – 63.
3. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Multi-Objective Ant Algorithm for Wireless Sensor Network Positioning, Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences, Vol. 66(3), 2013, 353 – 360.
4. Shindarov M., Fidanova S., Marinov P., Wireless Sensor Positioning Algorithm, In Proc of IEEE Conf. on Intelligent Systems, Sofia, Bulgaria, 2012, 419 – 424.
5. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Wireless Sensor Positioning ACO Algorithm, Studies of Computational Intelligence, J. Kacprzyk and K. Atanassov eds., Springer, Germany, (accepted).

Апробация на резултатите

Повечето от резултатите в дисертационния труд са докладвани на семинара на секции „Паралелни алгоритми” и „Научни пресмятания” към ИИКТ – БАН, както и на три международни конференции, както следва:

- International Conference of Information Systems and Grid Technologies, 30 – 31.05.2011 Sofia, Bulgaria.
- OMKO-NET International Conference, 28 – 30.06.2012 Southampton, UK.
- IEEE Conference on Intelligent Systems, 06 – 08.09.2012 Sofia, Bulgaria.

Резултатите от дисертацията са публикувани в 5 статии, от които 3 в томовете на международни конференции, 1 в списание с импакт фактор и 1 като глава от книга в поредица с SJR на реномираното научно издателство Springer.

ПРИНОСИ

Приносите в настоящия дисертационен труд са научноприложни и приложни.

Научно-приложните приноси като цяло са ориентирани към разработване на алгоритми, базирани на метода на мравките за решаване на задачата за изграждане на БСМ.

1. Разработен е еднокритериален алгоритъм на основата на метода на мравките, за решаване на задачата за построяване на БСМ. Задачата е сведена до еднокритериална чрез нормиране и сумиране на двете целеви функции.
2. Разработен е еднокритериален алгоритъм с тегла, на основата на метода на мравките, за решаване на задачата за построяване на БСМ. Задачата е сведена до еднокритериална чрез нормиране и сумиране с тегла на двете целеви функции.
3. Изследвано е влиянието на теглата върху качеството на постигнатите решения.
4. Разработен е многокритериален алгоритъм, на основата на метода на мравките за решаване на задачата за построяване на БСМ.

Приложните приноси са свързани с разработката на **софтуер за решаване на задачата, на C++**. Програмата е пригодена да разполага по оптимален начин сензори в двуизмерно пространство (правоъгълна област), в която може да има непроницаеми правоъгълни препятствия или области, за които не е необходимо наблюдение. Чрез препятствията могат да се моделират области, различни от правоъгълната.

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че
настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени
при проведени от мен научни изследвания (с подкрепата и
съдействието на научния ми ръководител).

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани
от други учени, са надлежно и подробно цитирани в
библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на
научна степен в друго висше училище, университет или научен
институт.

София
2014-01-22

Подпис:
М. Шиндаров

Цитирана литература

1. Alba E., Molina G., Optimal Wireless Sensor Layout with Metaheuristics: Solving a Large Scale Instance, Large-Scale Scientific Computing, LNCS 4818, 2008, 227 – 535.
2. Bai X. et all, Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity, In Proc. Of 7th ACM Int. Symp. On Mobile Ad-hoc networking and computing, 2006, 131 – 142.
3. Biagioni E>S>, Sasaki G., Wireless sensor placement for reliable and efficient data collection, In Proc. Of Hawaii int. conf on system science, IEEE computer society, 2003, 127b.
4. Bianchi L., Dorigo M., Gambardella L.M., Gutjahr W.J., A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization., Int. J. Natural Computing Vol. 8(2), 2009, 239 – 287.
5. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Oxford University Press, 1999.
6. Brass P., Bounds on coverage and target detection capabilities for model of networks of mobile sensors, ACM Transactions on Sensor Networks, 3(2), 2007, 9
7. Cevher V., Kaplan L.M., Acoustic sensor network design for position estimation, ACM Transactions on Sensor Networks , 5(3), 2009, 1 – 28.
8. Colorny A., Dorigo M., Maniezzo V., Distributed Optimization by Ant Colonies, actes de la premiere conference European sur vie artificielle, Paris, France, Elsevier pub., 1991, 134-142.
9. Deb K., Pratap A., Agrawal S., Meyarivan T., A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: Nsga-ii, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 2002, 182–197.
10. Deneubourg J.L., Aron S., Goss S., Pasteels J.M., The Self-Organising Exploatory Pattern of the Argentine Ant, J. of Insect Behavior 3, 1990; 159 – 168.
11. Dorigo M., Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
12. Dorigo M., Gambardella L.M., Ant Colony System, Futire Generation Computer Systems, Vol 16, 2000, 889-914.

13. Dorigo M., Stutzle, Ant Colony Optimization, MIT Press, 2004.
14. Durillo J.J, Nebro A.J., Luna F., Coello C.A., Alba E., Convergence Speed in Multi-Objective Metaheuristics Efficiency Criteria and Empirical Study, *Int. J. of Numerical Methods in Engineering*, Wiley, Vol 84(11), 2010, 1344 – 1375.
15. Doyle J., Reasoned Assumptions and Pareto Optimality, In *Proc. Of 9th IJCAI*, 1985, 87 – 90.
16. Fidanova S., ACO Algorithm with Edditional Reinforcement, *From Ant Colonies to Artificial Ants*, Lecture Notes in Computer Science, No2463, Springer, Germany, 2002, 292 – 293.
17. Fidanova S., Convergence Proof for a Monte Carlo Methods for Combinatorial Optimization Problems, *Computer Science, Lecture Notes in Computer Science No 2907*, Springer, 2004, 136 – 143.
18. Fidanova S., Marinov P., Alba E., ACO for Optimal Sensor Layout, In *Proc. of Int. Conf. on Evolutionary Computing*, Valencia, Spain, Joaquim Filipe and Janus Kacprzyk eds., SciTePress-Science and Technology Publications Portugal, ISBN 978-989-8425-31-7, 2010, 5–9.
19. Fidanova S., Marinov P., Alba E., Wireless Sensor Network layout, In *Monte Carlo Methods and Applications*, K. Sabelfeld, I. Dimov eds., Chapter 9, De Gruyter Pub. , Berlin, Germany, 2012, 39 – 46.
20. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Mono-objective Algorithm for Wireless Sensor Layout, In *Proc. Of OMKO-NET Int. Conference*, Southampton, UK, 2012a, 57 – 63.
21. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Optimal Sensor Layout Using Multi-Objective Metaheuristic, In *Proc. Of Int. Conf. of Information Systems and Grid Technologies*, Sofia, Bulgaria, 2011, 114 – 122.
22. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Multi-Objective Ant Algorithm for Wireless Sensor Network Positioning, *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, Vol. 66(3), 2013, 353 – 360.
23. Fidanova S., Shindarov M., Marinov P., Wireless Sensor Positioning ACO Algorithm, *Studies of Computational Intelligence*, J. Kacprzyk and K. Atanassov eds., Springer, Germany, (accepted).

24. Ganesan D., Cristescu R., Beferull-Lozano B., Power-efficient sensor placement and transmission structure for data gathering under distortion constraints, *ACM Transaction on Sensor Networks*, 2(2), 2006, 155 – 181.
25. Hernandez H., Blum C., Minimum Energy Broadcasting in Wireless Sensor Networks: An ant Colony Optimization Approach for a Realistic Antenna Model, *J. of Applied Soft Computing*, 11(8), 2011, 5684–5694.
26. Holland J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
27. Jain E., Liang Q., Sensor placement and lifetime of wireless sensor networks: theory and performance analysis, In *Proc. Of global telecommunication conference*, IEEE, 2005, 173 – 177.
28. Jourdan D.B., *Wireless Sensor Network Planning with Application to UWB Localization in GPS-denied Environments*, Massachusetts Institute of Technology, PhD thesis, 2000.
29. Jourdan D.B., Roy N., Optimal sensor placement for agent localization, *ACM transaction on sensor networks*, 4(3), 2008, 1 – 40.
30. Kar K., Banerjee S., Node placement for connected coverage in sensor networks, In *Proc. Of WiOpt*, 2003.
31. Kenedy J., Eberhard R., Particle Swarm Optimization, *IEEE Int. Conf on Neural Networks IV*, 1995, 1942 – 1948.
32. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P., Optimization by Simulated Annealing, *Science* 220, 1983, 671—680.
33. Konstantinidis A., Yang K., Zhang Q., Zainalipour-Yazti D., A multi-objective Evolutionary Algorithm for the deployment and Power Assignment Problem in Wireless sensor Networks, *J. of Computer networks*, 54(6), 2010, 960–976.
34. Lazos L., Poovendram R., Stochastic coverage in heterogeneous sensor networks, *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2(3), 2006, 325 – 358.
35. Lazos L., Poovendran R., Ritcey J.A., Analytic evaluation of target detection in heterogeneous wireless sensor networks, 5(2), 2009, 1 – 38.
36. Manohar P., Ram S.S., Manjunath D., Path coverage by a sensor field: the nonhomogeneous case, *Analytic evaluation of target detection in heterogeneous wireless sensor networks*, 5(2), 2009, 1 – 26.
37. Mathur V.K. How Well We Know Pareto Optimality,, *J. ECON. EDU.* 22(2), 1991, 172 – 178.

38. Molina G., Alba E., Talbi El-G., Optimal Sensor Network Layout Using Multi-Objective Metaheuristics, *Universal Computer Science* 14(15), 2008, 2549–2565.
39. Paek J., Kothari N., Chintalapudi K., Rangwala S., Govindan R., The Performance of a Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring, In *Proc. of 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks*, Istanbul, Turkey, Jan 31 – Feb 2, 2005.
40. Pareto V., *Course d'economie politique*. Rouge, Lausanne, Switzerland, 1896.
41. Paschalidis I.C., Guo D., Robust and distributed stochastic localization in sensor network theory and experimental results, *ACM transaction on sensor networks*, 5(4), 2009, 1—22.
42. Pilat M.L., *Wasp-Inspired Construction Algorithms*, Department of Computer Science, Nuiversity of Calgary, Canada, TN 2006-847-40, 2006.
43. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M., The Bees Algorithm, *Thechnical Note*, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK, 2005.
44. Pottie G. J., Kaiser W. J., Embedding the Internet: Wireless Integrated Network Sensors, *Communications of the ACM*, 43(5), 2000, 51–58.
45. Shindarov M., Fidanova S., Marinov P., Wireless Sensor Positioning Algorithm, In *Proc of IEEE Conf. on Intelligent Systems*, Sofia, Bulgaria, 2012, 419 – 424.
46. Stutzle T., Hoos H. H., MAX-MIN Ant System, *Future Generation Computer Systems* 16, 2000, 889–914.
47. Werner-Allen G., Lorinez K., Welsh M., Marcillo O., Jonson J., Ruiz M., Lees J., Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano, *IEEE Internet Computing* 10(2), 2006, 18–25.
48. Wettergren T.A., Costa R., Optimal placement of distributed sensors against moving targets, *ACM transaction on sensor networks*, 5(3), 2009, 1—25.
49. Wolf S., Mezz P., Evolutionary Local Search for the Minimum Energy Broadcast Problem, in C. Cotta, J. van Hemez (eds.), *VOCOP 2008, Lecture Notes in Computer sciences No. 4972*, Springer, Germany, 2008, 61–72.
50. Xu Y., Heidemann J., D. Estrin D., Geography Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing, *Proceedings of the 7th ACM/IEEE Annual International*

- Conference on Mobile Computing and Networking, Italy, 16-21 July 2001, 70–84.
51. Yang X.S., Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, Luniver Press, 2008.
 52. Yang X.S., A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, Studies of Computational Intelligence 284, Springer, 2010, 65 – 74.
 53. Younis M., Akkaya K., Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: a survey, Ad Hoc Networks, 6(4), 2008, 621 – 655.
 54. Yuce M. R., Ng S. W., Myo N. L., Khan J. Y., Liu W., Wireless Body Sensor Network Using Medical Implant Band, Medical Systems 31(6), 2007, 467–474.
 55. Zhang X., Wicker S. B., On the Optimal Distribution of Sensors in a Random Field, ACM Trans., Sens. Netw., Vol. 1(2), 2005, pp. 301 – 306.
 56. Zitzler E., Thiele L., Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(4), 1999, 257–271.
 57. Zlotchin M., Birattari M., Meuleau N., Dorigo M., Model-based search for combinatorial optimization: A critical survey, Annals of Operations Research, vol. 131, pp. 373-395, 2004
 58. .Атанасов Н. Длуский Г, Нуменоптера, Formicidae, Фауна на България, том 22. 1992. ISBN 954-430-038-4.
 59. Наков П., Добриков П., Програмиране ++ Алгоритми, София, TopTeam Co, 2003.
 60. Агрегат http://aggregate.tibbo.com/solutions/sensor_network.html?swln=ru 2013г
 61. Мравки <http://bg.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B8> 2013 г.
 62. Сп. Инженеринг ревю - брой 2, 2012, Март, <http://engineering-review.bg/engineering-statii.aspx?br=76&rub=829&id=1876> - 2013г.
 63. InTech <http://www.idtechex.com/research/reports/wireless-sensor-networks-wsn-2012-2022-forecasts-technologies-players-00314.asp?viewopt=showall> 2013 г.
 64. OpenWSN <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/2013/openwsnETT.pdf> 2013г.

- 65. SmartDust <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/> - 2014г
- 66. Стандарти http://hartcomm.org/hcf/news/pr2010/WirelessHART_approved_by_IEC.html -2013г

Приложение

За да могат да бъдат тествани и прилагани разработените в дисертацията алгоритми е написан софтуер, който ги реализира. Целта на разработената програма е да постави сензори в зададена област, като осигури пълно покритие на областта. Позицията на възлите се избира така, че да минимизира разходваната енергия от всеки отделен възел, както и броя на възлите (сензорите). Това са противоположни цели, тъй като наличието на повече сензори води до разделяне на носената от тях ретрансмисия на по-малки дялове. За да се определи енергията, която се разходва при комуникация, се изчислява броят на ретрансмисиите, които извършва всеки възел. Мрежата работи на серии. На всяка серия всеки възел събира данни от областта, която покрива и ги изпраща към ВЕКВ. Между сериите възлите са в нискоенергийно състояние. Всеки възел предава данни до неговите съседи, които са най-близо до ВЕКВ или директно на ВЕКВ, ако му е в комуникационния обхват. Ако няколко съседи се определят като най-близки до ВЕКВ, то броят съобщения се поделя между тях. Така броят съобщения предаден от един възел, е равен на входящия брой съобщения, увеличен с 1, собственото съобщение, а броят съобщения, които предава на всеки от съседните възли, равно отстоящи от ВЕКВ, е равен на броя на изходящите съобщения на възела, разделен на броя на равноотстоящите съседи.

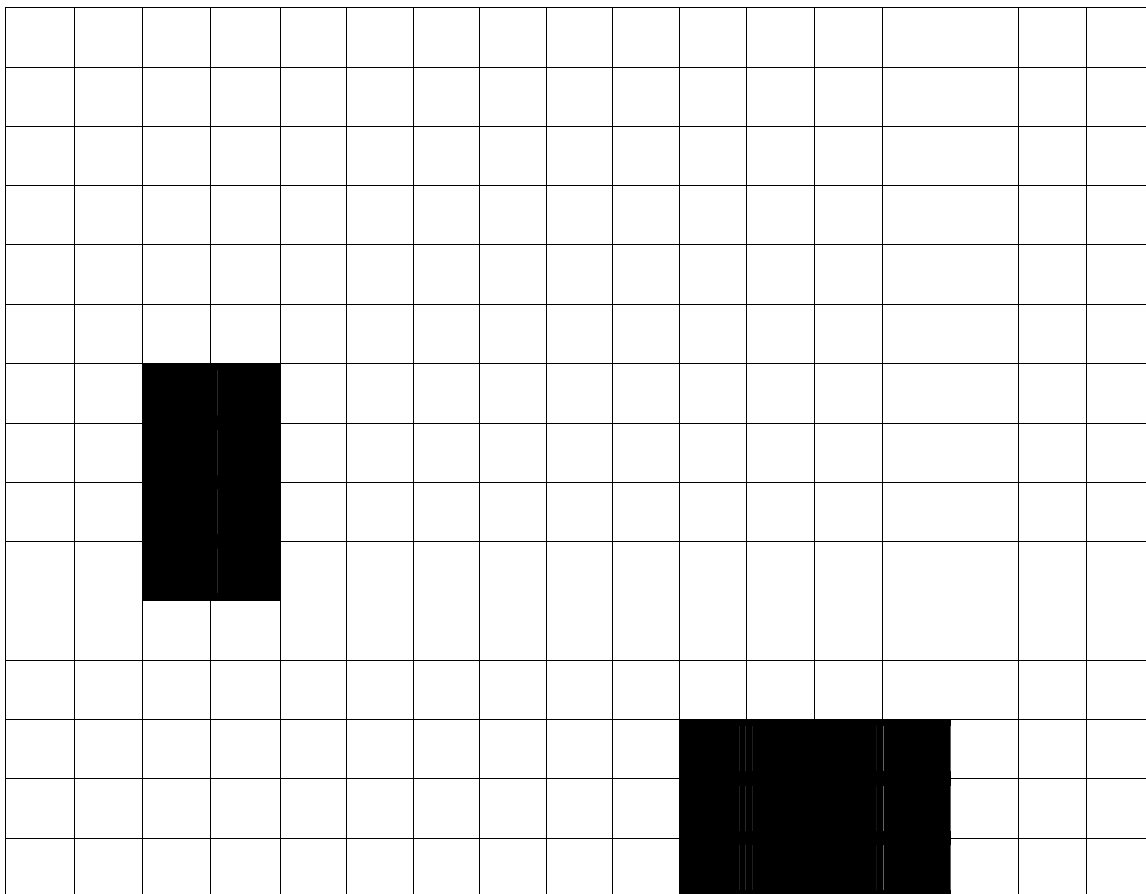
Входни данни

Програмата е пригодена да разполага, по оптимален начин, сензори в правоъгълна област, в която може да има непроницаеми правоъгълни препятствия или области, за които не е необходимо наблюдение. Така тя е подходяща и за използване при оптимално разполагане на сензори в нехомогенни площи. Примери за препятствия са колони, асансьорни шахти, павилиони и др. Пример за области, в които не е необходимо наблюдение, са билетни каси и др. Входните данни за програмата са размерите на областта $N \times M$ (дължина и ширина), радиус на покритие на сензорите R_{cov} , радиус на комуникация на сензорите R_{com} , брой на препятствията, размер на всяко препятствие (дължина и ширина), желае ли потребителят да постави ВЕКВ на точно определено място и ако да - координати на това място. Всички размери и координати са в относителни мерни единици. Долният ляв ъгъл на областта е с координати $(0,0)$ и спрямо него се изчисляват координатите на препятствията и

поставените сензори. От това, каква желаем да е големината на мерната единица, зависи точността на смятане. Например за видео наблюдение е достатъчно относителната мерна единица да е един дециметър (10 сантиметра). Тогава, ако наблюдаваната област е с размер $20\text{м} \times 50\text{м}$, то като вход на програмата се подава 200 за дължина и 500 за ширина. По подобен начин се подават и радиусите на покритие и комуникация. Например, ако радиусът на покритие е 5 м, а на комуникация 6 м, то като вход на програмата за съответните радиуси се подава 50 и 60. Когато комуникацията е жична, за радиус на комуникация се дава по-големият от размерите на областта (ширина или дължина). Размерите на препятствията се задават в същите мерни единици, в които се задават размерите на областта. Координатите на долния ляв ъгъл на всяко от препятствията се изчислява спрямо отстоянието му от краищата на областта в съответната мерна единица, като се има предвид, че координатите на долния ляв ъгъл на областта са $(0,0)$.

Пример 1.

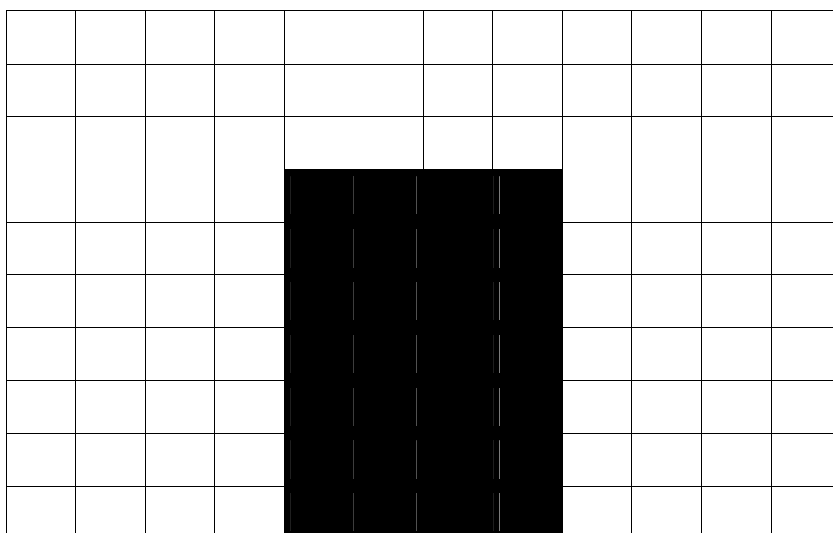
Трябва да се построи мрежа за наблюдение на правоъгълната област с две препятствия (изобразена на фигура 21 по-долу). Областта е с размер 17×15 мерни единици. Координатите на долния ляв ъгъл на едното препятствие са $(2,5)$ а размерът му е 2×4 мерни единици. Координатите на долния ляв ъгъл на другото препятствие са $(10,0)$ а размерът му е 4×3 мерни единици.



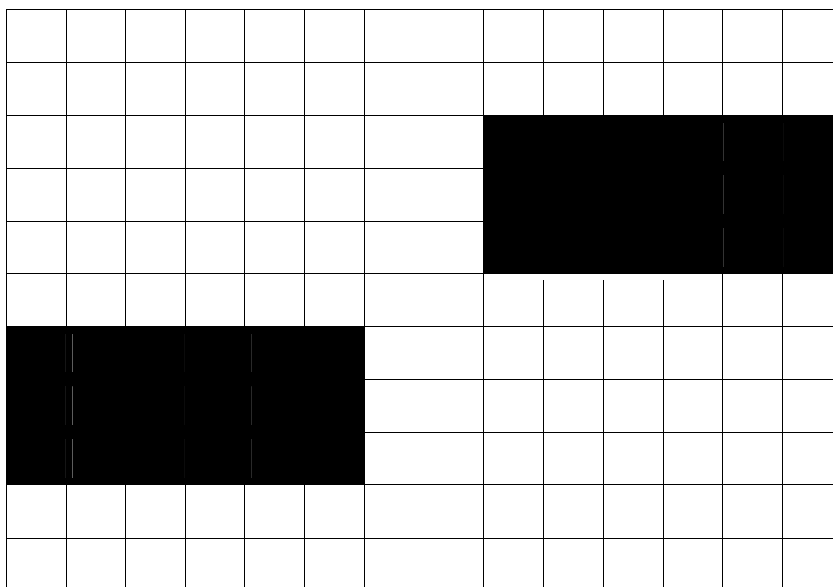
Фигура 21. Област с две препятствия

Възможности и области на приложение на програмата

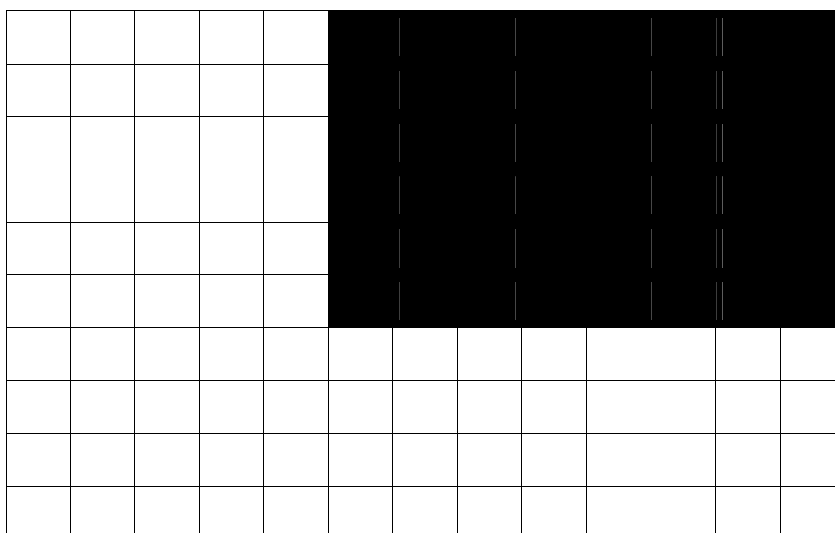
Програмата е направена да разполага по оптимален начин сензори в правоъгълна област, в която може да има правоъгълни препятствия. Използвайки препятствията, можем да прилагаме програмата и за области, различни от правоъгълната. На фигура 22 е изобразена П - образна област, добавяйки „препятствие”, центрирано в долната част на областта. На фигура 23 е изобразена S - образна област като са добавени „препятствия” в лявата, и в дясната част на областта. На фигура 24 е изобразена Г - образна област, добавяйки „препятствие” в единия от ъглите. На фигура 25 е изобразена О - образна област, прибавяйки „препятствие” в средата на областта.



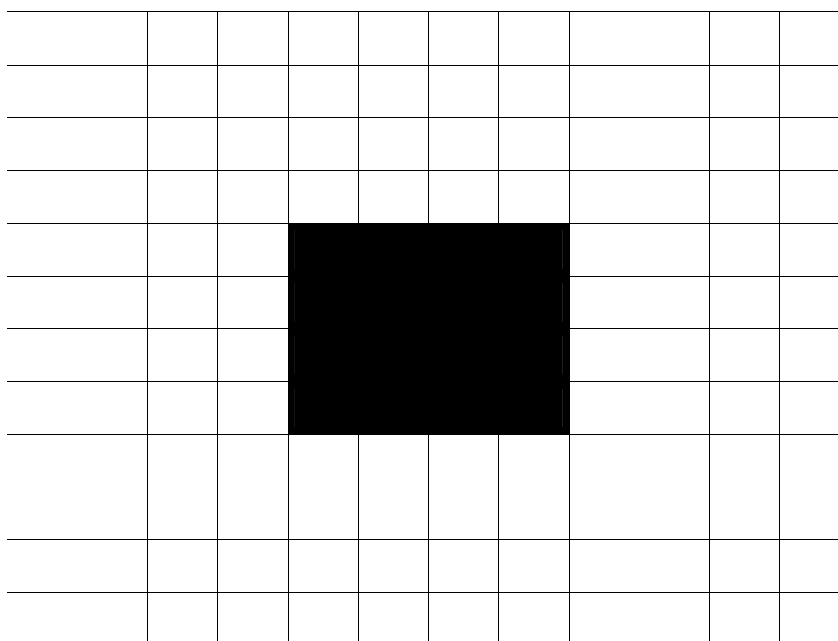
Фигура 22. П - образна област



Фигура 23. S - образна област



Фигура 24. Г - образна област

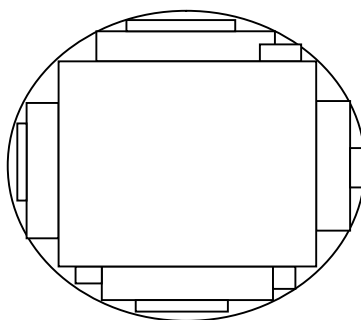


Фигура 25. О - образна област

Ако в областта има препятствие, което не е правоъгълно, то това се описва чрез вписани в него правоъгълници, както е показано в Пример 2 и Фигура 26.

Пример 2.

Нека в наблюдаваната област има препятствие което е с форма на кръг. То се описва с вписани в него правоъгълници, до постигане на необходимата точност както е показано на фигура 26.



Фигура 26. Изобразяване на препятствие с кръгла форма

По подобен начин се описват и области които имат заобляния. Тогава областта, която се задава като вход, е описаният правоъгълник, обхващащ всички точки от действителната област, а след това с правоъгълници като препятствия се описват частите, които не принадлежат на действителната област.

Исходни данни

Исходните данни са организирани в няколко таблици. Използвайки информацията от таблиците, потребителят би могъл да направи графично изображение на разпределението на сензорите, свързаността им и покритието на областта. В първата таблица се показва степента на покритие на всяка точка, като точките, попадащи в препятствия, са обозначени с 9, а там, където има сензор – с 8. След таблицата излиза текст, показващ броя на сензорите и енергията на мрежата. Втората таблица показва отдалечеността на всеки сензор от ВЕКВ. С 1 е показана позицията на ВЕКВ. В

точките, в които няма сензори, са поставени нули. Така се вижда свързаността на мрежата. На третата таблица са означени само позициите на сензорите, а в останалите точки са поставени нули. И при трите таблици последният ред, както и най-дясната колона, показват координатите на точките, при втората и третата таблици първият ред също показва координатите на точките.

GENERAL terms

BG	EN	FR	DE	ES	RU	CHI	IT
Оптимизация по метода на мравките	Ant colony optimization	Optimisation de colonie de fourmi	Optimierung von Ameisen Kolonien	Optimización de las colonias de hormigas	Оптимизация колонии муравьев	蚁群优化	Ottimizzazione delle colonie di formiche
Алгоритъм на мравките	Ant algorithm	Les fourmis de l'algorithme	Algorithm Ameisen	Hormigas algoritmo	Алгоритм муравьев	蚂蚁算法	Formiche Algoritmo
Колективна интелигентност	Swarm intelligence	L'intelligence en essaim	Optimierung Kolonien	Optimización de las colonias de hormigas	интеллекта роя	群智能	sciame intelligenza
Безжична сензорна мрежа	wireless sensor networks	réseaux de capteurs sans fil	Wireless-Sensornetzwerk	red de sensores inalámbricos	Беспроводная сенсорная сеть	无线传感 器网络	rete di sensori wireless
Оптимизация по метода на мравките	Ant colony optimization	Optimisation de colonie de fourmi	Optimierung von Ameisen Kolonien	Optimización de las colonias de hormigas	Оптимизация колонии муравьев	蚁群优化	Ottimizzazione delle colonie di formiche
Алгоритъм на мравките	Ant algorithm	Les fourmis de l'algorithme	Algorithm Ameisen	Hormigas algoritmo	Алгоритм муравьев	蚂蚁算法	Formiche Algoritmo
Колективна интелигентност	Swarm intelligence	L'intelligence en essaim	Optimierung Kolonien	Optimización de las colonias de hormigas	интеллекта роя	群智能	sciame intelligenza
Безжична сензорна мрежа	wireless sensor network	réseaux de capteurs sans fil	Wireless-Sensornetzwerk	red de sensores inalámbricos	Беспроводная сенсорная сеть	无线传感 器网络	rete di sensori wireless