

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

**СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УГРОЗЫ РАСКРЫТИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПЕЛЕНГАЦИЕЙ СИГНАЛОВ УЗЛОВ**

Работу выполнил А. В. Пекшев

[СОДЕРЖАНИЕ](#_Toc64583)

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc64583)

[1 Основные положения 5](#_Toc64584)

[1.1 Связность ad hoc сети и компоненты связности 5](#_Toc64585)

[1.2 Представление мобильной сети как геометрического графа 7](#_Toc64586)

[1.3 Пеленгация сигналов узлов сети 8](#_Toc64587)

[2 Вероятностный анализ мобильных сетей 10](#_Toc64588)

[2.1 Распределение вершин при моделировании сети 10](#_Toc64589)

[2.2 Начальные параметры, необходимые для моделирования 11](#_Toc64590)

[2.3 Результирующие параметры моделирования сети 14](#_Toc64591)

[3 Разработка программы 15](#_Toc64592)

[3.1 Общее описание 15](#_Toc64593)

[3.2 Описание работы программы 15](#_Toc64594)

[4 Анализ полученных значений 19](#_Toc64595)

[4.1 Зависимость угрозы пеленгации от количества вершин в сети 19](#_Toc64596)

[4.2 Зависимость угрозы пеленгации от уровня электромагнитного шума 20](#_Toc64597)

[4.3 Зависимость угрозы пеленгации от коэффициента пропорциональности передачи сигнала 21](#_Toc64598)

[4.4 Зависимость угрозы пеленгации от расстояния от сети 22](#_Toc64599)

[4.5 Анализ количества компонент 24](#_Toc64600)

[4.6 Поиск оптимальных решений 29](#_Toc64601)

[5 Результаты 41](#_Toc64602)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 43](#_Toc64603)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код программы 46](#_Toc64604)

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерные ad hoc сети – это беспроводные децентрализованные сети с узлами, расположенными в некоторой ограниченной или неограниченной области S. Каждый узел характеризуется своими координатами в области расположения сети и мощностью передатчика сигналов.

Данные сети играют важную роль при необходимости выполнения масштабных работ в местностях с плохо развитой или разрушенной вследствие стихийных бедствий инфраструктурой. В условиях чрезвычайной ситуации такие сети развертываются в области происшествия для обеспечения информационного взаимодействия между участниками ликвидации последствий ЧС.

Радиопередатчики, являющиеся основными участниками этой сети, имеют ограниченный радиус приема и передачи сообщений. Также узлы данной сети регулярно меняют свое положение в области своего нахождения, так как нередко перед такими сетями стоят задачи «прочесывания» местности, поэтому важными характеристиками таких сетей является связность сети, или возможность передачи сообщения между узлами с использованием других участников данной системы. Так как данные сети децентрализованы, при передаче сообщения нет единого центра, являющегося посредником при передаче – посредниками являются другие узлы системы, сохраняющие данное сообщение (буферизирующие) для дальнейшей передачи в случае возникновения подходящей ситуации.

Основываясь на этом, каждая ad hoc сеть должна обеспечивать передачу сигнала даже в условиях постоянного перемещения узлов. Таким образом, при развертке данных сетей стремятся использовать максимально возможное количество приемопередатчиков с мощными передатчиками сигналов.

Узлы данной сети, ввиду постоянной передачи сообщений и поиска соседей, которым можно передать сигнал, создают вокруг себя круговое электромагнитное поле, радиус которого есть радиус уверенной передачи сигнала. Таким образом, работоспособная сеть характеризуется электромагнитным полем передаваемых между узлами сигналов на области своего расположения. При помощи отслеживания интенсивности данного поля, или пеленгации сигналов узлов, возможно раскрытие существования данной сети.

Данная ситуация отражает одну из проблем таких сетей – при стремлении к максимальной работоспособности возможна избыточность, отражающаяся в чрезмерном электромагнитном фоне, генерируемом данной сетью, что может помешать работоспособности других сетей или привести к раскрытию существования сети в случае присутствия пеленгатора предполагаемого противника.

В данном случае важными характеристиками таких сетей являются не только связность сети, количество компонент связности, средние длины маршрутов, но и уровень электромагнитного поля, которое генерирует мобильная сеть ad hoc во время своей работы.

Целью данной работы является исследование вероятностей раскрытия существования мобильной сети пеленгатором предполагаемого противника, которое поможет определить уровень генерируемого распределенной системой электромагнитного поля.

# Основные положения

## Связность ad hoc сети и компоненты связности

Радиопередатчики, являющиеся основными участниками этой сети, имеют ограниченный радиус приема и передачи сообщений, поэтому важными характеристиками таких сетей является связность сети, или возможность передачи сообщения между узлами с использованием других участников данной системы.

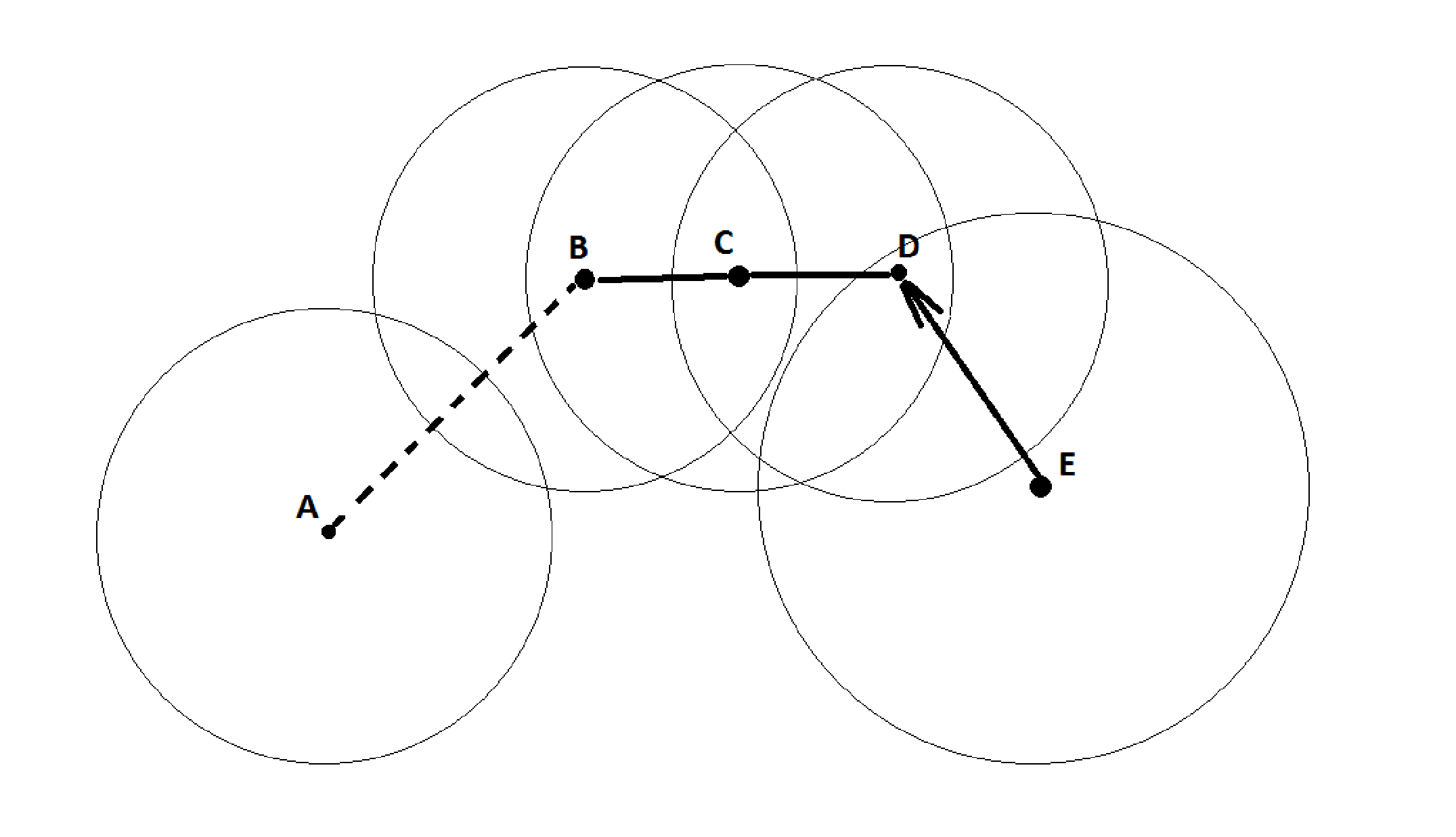
Для ориентированных графов имеется три уровня связности. Орграф сильно связный, если все его вершины взаимно достижимы (т.е. существует маршрут с учетом направления дуг из одной вершины в другую); односторонне связный, если для любых двух вершин, по крайней мере, одна достижима из другой; слабо связный, если при игнорировании направления дуг получается связный (мульти)граф. В противном случае граф несвязный.

Однако, сеть ad hoc может быть не связной в отдельный момент времени. Узлы данной сети непрерывно перемещаются в пространстве с уникальными скоростью и направлением. Таким образом, передача сигналов между узлами сети возможна даже при отсутствии связности сети. Такие сети зачастую называют оппортунистическими, поскольку передача сигнала производится при возникновении таковой возможности.

В таком случае принято говорить о динамической связности сети. Если распределение узлов сети, а также алгоритмы их движения не предусматривают постоянную несвязность мобильной сети, то сообщение в результате перемещения узлов в сети будет передано конечному получателю. На рисунке 1 приведен пример расположения узлов сети.

Рисунок 1 - Пример расположения узлов мобильной сети

Узлы B и C, C и D являются сильно связными между собой, так как попарно попадают в радиусы передачи сигнала друг друга. Узлы A и B несвязны, так как попарно не находятся в радиусах передачи сигнала. Узлы D и E слабо связны, так как лишь узел D попадает в радиус действия узла E, а не наоборот.

Таким образом, в каждый момент времени сеть ad hoc может представлять собой множество компонент связности. Компонента связности – множество вершин, в котором для каждых двух вершин существует путь из одной в другую. При этом данные компоненты могут быть как сильно связными, когда для каждого пути из вершины A в вершину B существует такой же путь из вершины B в вершину A (другими словами, все связи между узлами двусторонние), так и слабо связными при существовании односторонних соединений между узлами сети. Поскольку распад связной сети на несколько компонент возможен в любой момент времени, важными условиями функционирования сети являются постоянное перемещение узлов сети, изменение направления их движения и буферизация передаваемых сигналов.

Таким образом, для данных сетей считается допустимым разбиение множества узлов на несколько связных компонент с учетом вероятности будущих связей узлов.

## Представление мобильной сети как геометрического графа

В общем случае мобильную распределенную компьютерную сеть можно представить в виду геометрического графа. В таком случае узлы данной сети являются вершинами графа, а ребра, их соединяющие, указывают на возможность передачи сообщения. Таким образом, такой граф состоит из совокупности вершин, которым сопоставлены их координаты в области размещения мобильной сети S, и условных линий их соединения, проведенными в соответствии с мощностью передатчиков сигналов и приемников сигналов узлов сети.

Представление таких сетей в виде геометрического графа позволяет провести анализ их параметров. На основе данной модели возможен анализ конфигураций сети, разработка алгоритмов взаимодействия узлов между собой, включающие алгоритмы расположения узлов в данной области, алгоритмы перемещения и передачи сигналов между участниками сети. Благодаря генерации такой математической модели возможно смоделировать поведение сети на конкретной области в зависимости от мощности приемопередатчиков, их количества, начального распределения и алгоритмов их движения. Результатом являются значения среднего количества компонент связности, вероятность генерации сильно связной сети и т.п.

При перемещении узлов сети в каждый момент времени сеть переопределяется как геометрический граф, так как в связи с изменением координат узлов сети переопределяются и связи между ними. Так, при определенных алгоритмах перемещения узлов, данный граф может быть связным только в начальный момент времени, или в точке развертки сети, после чего ее узлы начинают прочесывание местности в разных направлениях, и граф становится несвязным до конца функционирования сети.

## Пеленгация сигналов узлов сети

При пеленгации сигналов узлов мобильных распределенных компьютерных сетей на области в некой точке располагается пеленгатор условного противника. Данное устройство отслеживает электромагнитные сигналы вокруг себя. Так же, как и узлы мобильной сети, данное устройство обладает неким радиусом приема сигнала. Основной функцией пеленгатора является отслеживание и перехват сетевых сообщений, основанный на регистрации множества сигналов определенной частоты, уровень сигнала которых значительно превосходит значение стабильного естественного электромагнитного шума на данной области.

Помехами для пеленгации сигнала может являться не только естественный электромагнитный шум, но и другие мобильные сети, погодные условия, индивидуальные устройства радиосвязи.

Кроме того, пеленгатор предполагаемого противника в основном располагается не в области распределения узлов мобильной распределенной компьютерной сети, а на некоем отдалении. Таким образом, при возникновении избыточного электромагнитного поля от эксплуатации сети вероятность пеленгации существования сети только возрастает.

Так как каждый узел сети образует вокруг себя электромагнитное поле, при попадании в пределы которого другой узел может получить от него сообщение, на плоскости, на которой распределена мобильная сеть, определена функция U(x,y), описывающая сумму электромагнитных излучений узлов в данной точке. Значения данной функции динамически изменяются во времени благодаря перемещению узлов сети. На основании значений этой функции в точке своего местонахождения пеленгатор может фиксировать существование мобильных сетей.

Таким образом, пеленгатор чувствителен к сигналам мобильных сетей. При этом, в отличие от передачи сигналов между узлами мобильной сети, при пеленгации учитывается не уровень сигнала конкретной вершины, а сумма уровней всех доступных сигналов узлов сети. Если данная сумма будет превосходить определенное значение электромагнитного шума в точке расположения пеленгатора, тот, в свою очередь, регистрирует существование мобильной сети ad hoc.

Проблема возможного перехвата сигнала при функционировании сети на некой области имеет нетривиальное значение. Так как перехват сигнала в общем случае означает превышение работающей сетью некого порога излучения электромагнитных сигналов, исследование пеленгации сигналов сети ad hoc также может рассматриваться как исследование суммы электромагнитных излучений узлами сети в случайной точке.

В связи с активным развитием мобильных систем проблема высокого уровня электромагнитных сигналов, воспринимаемых как шум, является особо острой и вынуждает операторов связи и администраторов мобильных сетей искать новые пути передачи и переходить на незанятые частоты сети.

# Вероятностный анализ мобильных сетей

## Распределение вершин при моделировании сети

При рассмотрении конфигураций сетей возможно рассмотрение случайной конфигурации в неопределенный промежуток времени. Поскольку движение узлов в ограниченной области является индивидуально случайным, равномерное независимое случайное распределение вершин в данной области отражает возможную конфигурацию сети в случайный момент времени.

Равномерное случайное независимое распределение величины на отрезке [a, b] – распределение величины на интервале [a, b], характеризующееся одинаковой плотностью распределения величин на данном интервале. Распределение называется независимым, так как при генерации новых значений значения прошлых распределений не учитываются. Таким образом, генерируется ситуация, где вершины находятся в случайном месте, или же состояние сети в случайный момент времени.

При этом моделирование движения данных узлов мобильной сети не требуется, поскольку в данном случае при достаточном количестве испытаний состояние сети будет усреднено, вследствие чего возможно измерение электромагнитного поля генерируемой сети.

При генерации нового узла в мобильной сети на двумерной плоскости значения координат данного узла по оси абсцисс и ординат будут равномерно распределены в пределах области распределения.

## Начальные параметры, необходимые для моделирования

Основные параметры, идентифицирующие развертку сети: а) размеры обрасти развертки сети;

б) количество узлов мобильной сети;

в) радиус приема и передачи сообщений для узлов (также зависит от

области в силу различных препятствий прохождению сигнала);

г) уровень электромагнитного шума в области развертки мобильной сети;

д) расстояние между мобильной сетью и пеленгатором.

Для анализа угрозы раскрытия существования мобильной транспортной сети используется генерация случайно распределенной сети, отражающая положение узлов сети в некоторый момент времени. Область распределения представляет собой круг, внутри которого располагаются приемопередатчики. Радиус данной области равен 5, в дальнейшем данное значение может масштабироваться для рассмотрения реальных областей.

Количество вершин в мобильной распределенной компьютерной сети является одним из важнейших параметров, от которого зависит плотность распределения узлов для конкретной области. Рассмотрим этот параметр в интервале от 5 до 50 с шагом в 5 вершин. Таким образом будут рассмотрены сильно распределенные сети и достаточно плотные, претендующие на сильную связность.

Передача сигнала между узлами имеет зависимость от нескольких параметров и имеет вид k\*R-α, где k – коэффициент пропорциональности, отражающий проходимость сигнала, R – расстояние между участниками передачи, α – коэффициент пропорциональности затухания сигнала.

В данном случае, коэффициент пропорциональности k – параметр, совмещающий в себе множество различных параметров области и сети, таких как мощность передатчиков, их чувствительность к приему сообщения, общий уровень проходимости сигнала в данной области. В результате предварительных испытаний было выявлено, что данный коэффициент наиболее полно отражает свое влияние на значениях от 1 до 50 с шагом 5.

Параметр α в данном случае является общим параметром, отражающим затухание сигнала, зависящее от конкретной области, частоты передаваемых сигналов и препятствий на пути его передачи. С удалением от источника сигнала электромагнитное поле, излучаемое им, ослабляется, и данный коэффициент является степенью при расстоянии от источника сигнала. Данный параметр изменяется от 2 (слабое затухание) до 6 (сильное затухание).

Параметр ω характеризует общий электромагнитный шум, то есть сумму естественного электромагнитного шума данной области и иных факторов, создающих электромагнитный фон для передачи сигналов сети. Электромагнитный шум и коэффициенты пропорциональности, влияющие на передачу сообщения, являются параметрами, уникальными для области развертки.

Значение данной зависимости описывает взаимодействие между узлами сети. Для двух случайных узлов мобильной сети R – расстояние между ними, значения параметров k и α задаются при моделировании сети. Если значение уровня сигнала превышает общий электромагнитный шум в точке нахождения приемника сигнала, то приемник получает сигнал от первого узла. В противном случае, узел не слышит источник сообщения.

Радиус передачи - расстояние от источника сигнала до точки, где уровень сигнала приемопередатчика совпадает с уровнем электромагнитного шума. Таким образом, вокруг каждого приемопередатчика образуется круг, характеризующий его возможность передачи сообщения.

Пеленгатор в данной модели – приемник сообщений. Однако, если при передаче сообщений между вершинами имеет значение конкретный уровень сигнала вершины-передатчика, то при пеленгации сигналов узлов имеет значение сумма значений уровней сигналов от всех вершин, то есть значение функции U(x, y), отражающей значение создаваемого компьютерной сетью электромагнитного поля. Это значение также сравнивается со значением общего электромагнитного шума, определенного на области, и при превышении уровнем сигнала мобильной сети этого значения считается, что пеленгатор обнаружил существование мобильной распределенной компьютерной сети.

Пеленгатор размещается на некотором расстоянии от начала координат, в котором располагается центр области распределения узлов мобильной сети. На основании предварительных замеров, наиболее важными значениями смещения пеленгатора являются значения в промежутке от 4 до 8 с шагом 0.5.

Пример распределения вершин на области и местоположения пеленгатора предполагаемого противника представлен на Рисунке 2. Значение Rp – смещение пеленгатора относительно центра области распределения узлов мобильной распределенной компьютерной сети.

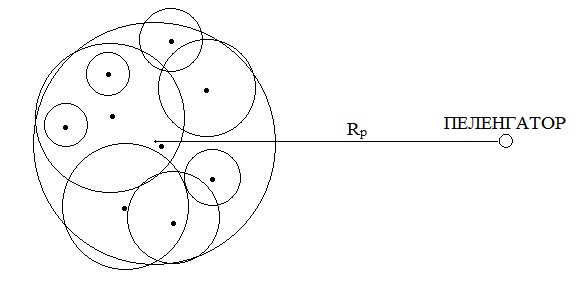


Рисунок 2 – Пример расположения узлов сети и пеленгатора предполагаемого противника относительно нее

## Результирующие параметры моделирования сети

Параметры, наиболее важные при таком исследовании:

а) вероятность полной связности сети – количество сильно связанных

сетей по отношению к количеству сгенерированных сетей;

б) среднее количество компонент связности;

в) вероятность раскрытия существования сети (вероятность пеленга) – отношение успешных попыток пеленга сети к общему числу попыток раскрытия существования сети.

Количество испытаний – 105 для каждого из перечисленных выше наборов начальных параметров. Данного количества достаточно для нахождения достаточно точных усредненных значений, на основе которых можно анализировать вероятность раскрытия существования сети и общую работоспособность сети.

Данные параметры сохраняются и подвергаются исследованию на нахождение зависимостей, которые при будущем масштабировании могут быть полезны для определения оптимальной области развертки сети и оптимальных параметров сети, при которых сохраняется относительная связности сети, включающая полную связность или малое количество компонент связности, и низкую угрозу раскрытия существования данной сети пеленгатором предполагаемого противника.

# Разработка программы

## Общее описание

Для написания программы использовался язык C# версии 7.0, создавалась программа на фреймворке .NET Core, тестирование производилось на компьютере с параметрами:

а) процессор: Intel Core i5-4460 CPU @ 3.20GHz (4 CPUs);

б) память: 8192MB RAM;

в) операционная система: Windows 10 Pro 64-bit (10.0, Build 14393).

Данная программа перебирает такие начальные параметры, как количество узлов сети NODES\_COUNT, уровень электромагнитного шума ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA, коэффициент проходимости сигнала COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K и степень затухания сигнала DEGREE\_ALPHA, а также смещение пеленгатора относительно центра координат (в том числе от центра области распределения узлов) PELENGATOR\_OFFSET. На основе этих данных генерируется случайный геометрический граф, узлы которого равномерно распределены на круге радиусом REGION\_RADIUS = 5. Данные параметры вынесены в отдельный класс для удобства настройки при запуске перебора, перебор значений полный. Количество испытаний настраивается параметром NUMBER\_OF\_TESTS, равным по умолчанию 105 для нахождения максимально точных усредненных результирующих значений.

## Описание работы программы

Данная программа в своей точке входа Main(string[] args) начинает перебор всех данных значений. Далее вызывается конструктор класса мобильной сети Network(), в котором генерируются и хранятся в списке объекты класса вершин данной генерируемой сети.

Изначально вызывается процедура CreateNetwork(). В ней в пределах данной области по осям абсцисс и ординат с использованием случайного равномерного независимого распределения генерируются случайные значения, являющиеся координатами нового узла мобильной сети и заполняется список сгенерированных для данной сети вершин.

Для сгенерированных вершин с использованием процедуры ComputeAdjacencyMatrix() строится матрица смежности. Условием условного соединения вершин является полный попарный перебор всех вершин графа. Для каждой такой пары вершин ищется расстояние между ними, которое используется для нахождения уровня сигнала k\*R-α. Если данное значение превосходит уровень электромагнитного шума ω, то в ячейке матрицы смежности на строке с номером вершины-источника и в столбце с номером вершины-приемника ставится значение 1, характеризующее наличие сигнала, иначе – значение 0.

Следующим шагом заполненная матрица смежности является основой для формирования списка компонент связности. Вызывается процедура ComputeConnectivityComponentList(), которая также проверяет граф на полную связность – граф является связным, если найдена лишь одна компонента связности.

Для поиска компонент связности используется модифицированный алгоритм обхода графа в глубину. Данный алгоритм является одним из основных алгоритмов в теории графов, поскольку позволяет обойти все доступные вершины, начиная из выбранной. Его модификация заключается в сохранении результатов достижения вершин из выбранной, которое позволяет выделить в сгенерированном графе компоненты связности.

Из процедуры по поиску компонент связности вызывается функция DFS(int startNode, bool[] used). На вход данная функция принимает корневую вершину (основную для своего вызова) и массив использованных вершин, все се вершины изначально помечены false. Для полного прохода графа данный алгоритм запускается для каждой неиспользованной ранее вершины. Данный алгоритм является рекурсивным. Основой для возврата из рекурсивной ветви является отсутствие не посещённых соседей для вершины, корневой для данного вызова функции. При вызове данной функции корневая вершина проверяет всех своих соседей, то есть вершины, к которым из нее есть непосредственный сигнал, и если она еще не была посещена, инициирует вызов функции для данного соседа.

Возвращаемым значением функции является список посещенных вершин. Вызывая данную функцию для всех своих соседей, корневая вершина получает список всех доступных, возможно, через посредников, вершин, и конкатенирует данный список с собственным номером, возвращая итоговый список вершин вверх по линии рекурсии. После формирования списка одной из компонент связности вошедшие в него вершины исключаются из общего списка вершин, из которых следует запускать данный алгоритм, для оптимизации работы алгоритма и исключения повторений компонент связности.

Далее данная функция запускается для всех оставшихся вершин. Если в итоге в списке неиспользованных вершин осталась единственная вершина, она помечается как отдельная компонента связности и также помещается в общий список.

Каждое возвращенное значение есть компонента связности класса ConnectivityComponent, которая сохраняется в список компонент связности. На основании полученного списка вычисляется длина данного списка, и если она равна 1, значит, все вершины данного геометрического графа, то есть все узлы мобильной сети, попали в одну компоненту связности, следовательно, граф является связным.

Для проверки пеленгации данной сети создается объект класса Pelengator в случайной точке области распределения мобильной сети. Далее вызывается функция ComputePeleng(), которая на основании уже распределенных вершин мобильной компьютерной сети вычисляет значение функции U(x, y), то есть находит общий уровень электромагнитного излучения мобильной сети в точке нахождения пеленгатора. Сумма вычисляется на основании сигналов от каждого узла сети с использованием зависимости k\*R-α. R – расстояние от узла сети до местонахождения пеленгатора предполагаемого противника, коэффициенты k и α заданы общими для всей сети. Если сумма данных уровней сигнала превышает значение общего электромагнитного шума ω, то регистрируется раскрытие существования данной мобильной сети, и функция возвращает значение true.

После выполнения данных функций полученные данные о количестве компонент связности и попытке пеленга собираются и сохраняются. Количество компонент связности в данном случае судит о возможной работоспособности сети, а результаты попытки пеленга – о возможном раскрытии существования сети ad hoc. Данный алгоритм запускается 105 раз для каждого уникального набора перебираемых параметров и усредняется.

Полученные данные записываются в текстовый файл с разделителем «;», после чего эти данные могут быть экспортированы для дальнейшего анализа. Полученные данные идентифицируют работоспособность сети при данных параметрах и уровень электромагнитного излучения, которое она генерирует.

# Анализ полученных значений

## Зависимость угрозы пеленгации от количества вершин в сети

Рассмотрим зависимость угрозы пеленгации от количества вершин.

Данная зависимость показана на Рисунке 3.

0

2

0

,

4

0

,

6

,

0

8

,

0

1

1

,

2

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Веротяность пеленга

Количество вершин

Рисунок 3 - График зависимости вероятности раскрытия существования сети от количества вершин

На данном графике представлена зависимость угрозы раскрытия существования мобильной распределенной компьютерной сети от количества вершин в данной сети. Параметры выборки равны:

а) степень затухания α = 2;

б) коэффициент распространения сигнала k = 40;

в) уровень электромагнитного шума ω = 40;

г) Смещение пеленгатора относительно границы сети = 1,5.

Видно, что с возрастанием количества узлов мобильной сети растет и вероятность раскрытия ее существования. Это объясняется тем, что с ростом количества вершин растет и уровень электромагнитного излучения, испускаемого ими. Таким образом, для каждой мобильной сети необходимо грамотно выбирать количество узлов в зависимости от параметров области распределения сети, так как при избыточном количестве узлов вероятность раскрытия данной сети возрастает до 100 процентов.

## Зависимость угрозы пеленгации от уровня электромагнитного шума

Рассмотрим зависимость угрозы раскрытия существования сети от уровня электромагнитного шума. Данная зависимость отражена на Рисунке 4.

0

0

,

2

0

,

4

0

,

6

8

,

0

1

1

,

2

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Вероятность пеленга

Уровень электромагнитного шума

Рисунок 4 – График зависимости угрозы раскрытия существования мобильной сети от уровня общего электромагнитного шума ω

Данный график показывает, что при росте уровня общего электромагнитного шума вероятность раскрытия сети значительно понижается.

Параметры, при которых находилась данная зависимость:

а) количество вершин мобильной сети n = 40;

б) степень затухания сигнала α = 4;

в) коэффициент распространения сигнала k = 30;

г) смещение пеленгатора относительно границы сети = 0,5.

Таким образом, зная, что в данной области высокий уровень электростатического шума, для развертки сети на данной области, даже невзирая на малое отдаление от вероятного расположения пеленгатора противника, возможно использовать большее количество приемопередатчиков большей мощности.

## Зависимость угрозы пеленгации от коэффициента пропорциональности передачи сигнала

Рассмотрим зависимость угрозы пеленгации от коэффициента пропорциональности передачи сигнала. Данная зависимость отражена на Рисунке 5.

Данный график показывает, что при возрастании коэффициента распространения сигнала возрастает и угроза раскрытия существования сети.

Параметры, при которых проводилось исследование:

а) количество вершин мобильной сети n = 40;

б) степень затухания сигнала α = 3;

в) уровень электромагнитного шума ω = 25;

г) смещение пеленгатора относительно границы распределения мобильной сети = 1.

0

,

0

1

2

0

,

3

,

0

,

4

0

,

0

5

0

,

6

0

,

7

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Вероятность пеленга

Коэффициент распространения сигнала

Рисунок 5 - График зависимости угрозы раскрытия существования мобильной сети от коэффициента распространения сигнала k

Данные результаты объясняются тем, что с ростом коэффициента распространения сигнала растет и уровень распространения электромагнитного шума, испускаемого данной сетью. Таким образом, на местности, где почти нет препятствий распространению сигнала, необходимо развертывать сеть с меньшим количеством узлов, поскольку в ином случае уровень электромагнитного шума может привести к раскрытию существования сети.

## Зависимость угрозы пеленгации от расстояния от сети

Рассмотрим зависимость угрозы пеленгации от смещения пеленгатора относительно границ сети. Данная зависимость отражена на Рисунке 6.

0

0

,

2

0

,

4

,

6

0

0

8

,

1

1

,

2

4

4

,

5

5

5

5

,

6

6

,

5

7

7

,

5

8

Вероятность пеленга

Смещение пеленгатора относительно центра области распределения

Рисунок 6 – График зависимости угрозы раскрытия существования мобильной сети от смещения относительно центра области распределения узлов

Поскольку на данном графике описывается зависимость угрозы раскрытия существования мобильной сети от смещения относительно центра распределения, значения по оси абсцисс следует уменьшить на значение радиуса распределяемой сети, то есть на 5. Параметры, при которых проводилось данное исследование:

а) количеств узлов мобильной сети n = 40;

б) степень затухания уровня сигнала α = 3;

в) коэффициент распространения сигнала k = 40;

г) уровень электромагнитного шума ω = 20.

Заметно, что при нахождении пеленгатора в пределах области распределения, то есть для значений смещения от 4 до 5, угроза раскрытия существования сети критически высока. Однако, при отдалении пеленгатора от границ сети, вероятность раскрытия ее существования значительно понижается. Таким образом, при удалении от области распределения сети от местонахождения пеленгатора возможного противника, уровень вероятности раскрытия существования мобильной сети значительно понижается.

## Анализ количества компонент

Хоть заметно, что при уменьшении количества вершин в сети и увеличении уровня общего электромагнитного шума вероятность пеленгации повышается, нельзя забывать о функционировании сети. Важнейшими параметрами мобильных сетей, как уже было сказано, являются связность и, если граф несвязен, количество компонент связности. Таким образом, стремясь к уменьшению вероятности раскрытия существования сети, может пострадать ее работоспособность.

Таким образом, необходимо исследовать влияние параметров сети и области распределения на количество компонент, на которые разбивается сеть.

Изначально исследуем зависимость количества компонент от количества вершин в распределяемой мобильной сети. Данная зависимость отражена га

Рисунке 7.

0

1

2

3

4

5

6

7

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Количество компонент связности

Количество узлов в мобильной сети

Рисунок 7 - График зависимости количества компонент связности от количества узлов мобильной сети

Данные зависимости были получены при следующих параметрах:

а) степень затухания сигнала α = 2;

б) коэффициент распространения сигнала k = 35;

в) уровень электромагнитного шума ω = 10.

Заметно, что при количестве вершин, не превышающем 15, данная сеть разбивается на 4 и более компонент. Данные значения не являются критичными для работоспособности сети, однако, можно заметить, что при увеличении количества вершин количество связных компонент начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что при возрастании количества вершин возрастает и количество возможных связей между узлами сети.

Данная зависимость сохраняется также при изменении других параметров. Рассмотрим ту же зависимость при переменных значениях параметра электромагнитного шума ω. Результаты отражены на Рисунке 8.

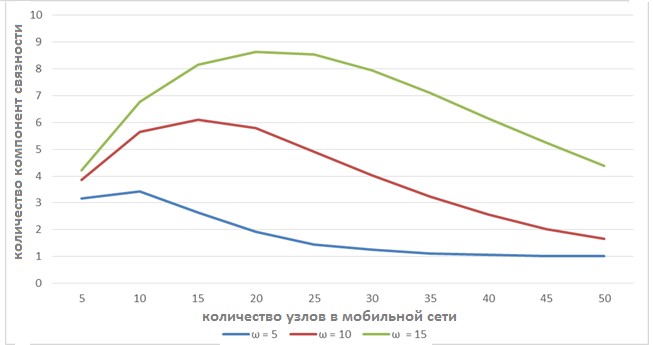


Рисунок 8 - График зависимости количества компонент связности от количества узлов сети при переменном уровне электромагнитного шума Также можно рассмотреть данную зависимость при переменном уровне затухания сигнала. Данная зависимость отражена на Рисунке 9.

0

2

4

6

8

10

12

14

50

50

50

50

50

50

50

50

Количество компонент связности

Количество узлов в мобильной сети

α = 2

α = 3

α = 4

Рисунок 9 – График зависимости количества компонент связности от количества узлов мобильной сети при изменяющейся степени затухания сигнала α

Данные зависимости были найдены при параметрах:

а) коэффициент распространения сигнала k = 4;

б) уровень электромагнитного шума ω = 15.

На основании данных графиков заметно, что изменение количества вершин активно влияет на количество компонент связности в графе. Количество компонент связности возрастает до некого критического значения, определяемого такими параметрами области распределения, как степень затухания сигнала и коэффициент распространения сигнала, однако в общем случае при постоянном увеличении количества вершин на ограниченной области количество компонент связности будет стремиться к 1, то есть к полной связности графа.

Проследим за зависимостью количества компонент связности от степени затухания сигнала α. Данная зависимость отражена на Рисунке 10.

0

2

4

6

8

10

12

14

2

3

4

5

6

Количество компонент связности

Степень затухания сигнала

Рисунок 10 – График зависимости количества компонент от степени затухания сигнала α

Данные замеры проводились при следующих значениях параметров:

а) количество узлов сети n = 50;

б) коэффициент распространения сигнала k = 40;

в) уровень электромагнитного шума ω = 5.

Заметно, что с ростом степени затухания сигнала сеть распадается на все большее количество компонент связности. Это объясняется меньшими радиусами уверенного приема и передачи для узлов сети, вследствие чего нарушается связность сети.

Проследим также за влиянием коэффициента распространения сигнала на количество компонент связности. Данная зависимость отражена на Рисунке 11.

0

10

20

30

40

50

60

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Количество компонент связности

Коэффициент распространения сигнала

Рисунок 11 - График зависимости количества компонент от коэффициента распространения сигнала k

Данные зависимости были найдены при следующих значениях параметров:

а) количество вершин n = 50;

б) степень затухания сигнала α = 4;

в) уровень электромагнитного шума ω = 5.

Заметно, что при увеличении коэффициента распространения сигнала количество компонент связности активно уменьшается. Это объясняется тем, что с ростом возможности распространения сигналов сети возрастает и радиус уверенного приема и передачи для каждого узла, вследствие чего возрастают и значения связности.

## Поиск оптимальных решений

Проследив закономерности зависимости угрозы раскрытия существования мобильной распределенной компьютерной сети и связности сети от основных параметров сети и области ее развертки, необходимо найти оптимальное решение задачи, то есть такие параметры сети, при которых минимальна количество компонент связности и минимальна угроза пеленгации сети.

Таким образом, главной задачей является поиск оптимальных значений параметров сети, при которых поддерживается максимально возможная связность сети, или минимальное количество компонент связности, вкупе с минимальной угрозой раскрытия существования мобильной сети.

Очевидно, что самыми подходящими результатами будут те, где вероятность генерации связной сети выше вероятности раскрытия существования сети. Таким образом, на основании нахождения разности между вероятностью связности и вероятностью раскрытия существования сети были вычислены самые подходящие значения.

Брались значения данной разности, превосходящие 0,1. Единственным значением степени затухания сигнала α в данной выборке является значение 4.

Результаты выборки представлены в Таблице 1.

На основании данной таблицы видно, что оптимальным значением степени затухания сигнала на области развертывания мобильной распределенной компьютерной сети является значение 4. Неудивительно, что в эту выборку попали максимальные возможные рассматриваемые значения удаления пеленгатора от сети, так как при удалении от источников сигнала электромагнитное поле становится менее интенсивным.

Таблица 1. Результаты выборки на основании нахождения разности вероятностей генерации связной сети и раскрытия существования мобильной сети при значениях разности больше 0.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N | α | k | ω | Смещение | Число компонент | Вер-ть связности | Вер-ть пеленга | Разность вероятностей |
| 40 | 4 | 50 | 5 | 8 | 3,145 | 0,103 | 0 | 0,103 |
| 45 | 4 | 45 | 5 | 7,5 | 2,846 | 0,143 | 0 | 0,143 |
| 45 | 4 | 45 | 5 | 8 | 2,895 | 0,13 | 0 | 0,13 |
| 45 | 4 | 50 | 5 | 7,5 | 2,545 | 0,201 | 0,002 | 0,199 |
| 45 | 4 | 50 | 5 | 8 | 2,574 | 0,2 | 0 | 0,2 |
| 50 | 4 | 35 | 5 | 8 | 3,225 | 0,104 | 0 | 0,104 |
| 50 | 4 | 40 | 5 | 7,5 | 2,69 | 0,17 | 0 | 0,17 |
| 50 | 4 | 40 | 5 | 8 | 2,687 | 0,173 | 0 | 0,173 |
| 50 | 4 | 45 | 5 | 7,5 | 2,383 | 0,237 | 0,003 | 0,234 |
| 50 | 4 | 45 | 5 | 8 | 2,342 | 0,252 | 0 | 0,252 |
| 50 | 4 | 50 | 5 | 7,5 | 2,059 | 0,347 | 0,006 | 0,341 |
| 50 | 4 | 50 | 5 | 8 | 2,11 | 0,312 | 0 | 0,312 |

Заметим, что уровень общего электромагнитного шума в области распределения узлов мобильной сети равен значению 5, а коэффициент распространения сигнала k принимает высочайшие значения. В то же время, ранее рассматривалось улучшение результатов обнаружения существования сети при повышении коэффициента k и уменьшении уровня шума. Таким образом, можно сделать вывод, что самым значимым параметром, влияющим на обнаружение сети пеленгатором предполагаемого противника, является удаление данного пеленгатора от области распределения узлов мобильной сети, так как при его увеличении положительные зависимости пеленга от высокого количества узлов, высокого коэффициента распространения сигнала и низкого электромагнитного шума нивелируются.

Таким образом, угроза раскрытия существования мобильной распределенной компьютерной сети оказалась минимальна даже при высоком уровне сигналов от каждого узла. При этом стоит помнить, что в данной таблице смещение указано от центра координат, то есть реальное отдаление пеленгатора предполагаемого противника составляет на 1 радиус меньше, или от 2,5 до 3 единиц длины. Таким образом, регистрация существования мобильной сети становится практически невозможна уже на отдалении на половину радиуса области распределения узлов сети, даже если остальные параметры сети положительно влияют на вероятность пеленга. В свою очередь, в данной ситуации данные значения играют роль для работоспособности сети, так как таким образом возрастает процент генерации связной сети и уменьшается среднее количество компонент связности.

Рассмотрим также значения разности вероятности обнаружения мобильной сети и вероятности раскрытия ее существования, превышающие

0,01 и не превышающие 0,1. Данная выборка показана в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты выборки на основании нахождения разности вероятностей генерации связной сети и раскрытия существования мобильной сети при значениях разности в интервале [0.01; 0.1]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N | α | k | ω | Смещение | Число компонент | Вер-ть связности | Вер-ть пеленга | Разность вероятностей |
| 50 | 4 | 30 | 5 | 7 | 3,974 | 0,039 | 0,029 | 0,01 |
| 50 | 4 | 25 | 5 | 7 | 4,934 | 0,016 | 0,005 | 0,011 |
| 45 | 5 | 45 | 5 | 7 | 4,933 | 0,012 | 0 | 0,012 |
| 50 | 5 | 35 | 5 | 7 | 5,08 | 0,015 | 0 | 0,015 |
| 50 | 5 | 40 | 5 | 7 | 4,635 | 0,015 | 0 | 0,015 |
| 50 | 4 | 50 | 10 | 7 | 4,848 | 0,017 | 0,002 | 0,015 |
| 50 | 4 | 50 | 5 | 7 | 2,059 | 0,348 | 0,332 | 0,016 |
| 45 | 5 | 50 | 5 | 7 | 4,553 | 0,018 | 0,001 | 0,017 |
| 50 | 4 | 45 | 5 | 7 | 2,316 | 0,254 | 0,236 | 0,018 |
| 50 | 4 | 40 | 5 | 7 | 2,737 | 0,158 | 0,137 | 0,021 |
| 50 | 4 | 35 | 5 | 7 | 3,177 | 0,096 | 0,061 | 0,035 |
| 50 | 5 | 45 | 5 | 7 | 4,068 | 0,036 | 0 | 0,036 |
| 50 | 5 | 50 | 5 | 7 | 3,663 | 0,057 | 0 | 0,057 |

Данные результаты повторяют проведенные ранее исследования зависимостей количества компонент связности и вероятности раскрытия существования сети от параметров сети и области распределения ее узлов. Заметно, что с приближением к границам сети месторасположения пеленгатора предполагаемого противника, увеличением коэффициента распространения сигнала и уменьшением уровня электромагнитного шума вероятность раскрытия существования сети повышается. Данные результаты повторяют исследование зависимостей, отраженное на Рисунке 5.

Таким образом, полученные ранее результаты можно уточнить. Вероятность раскрытия существования мобильной распределенной компьютерной сети уменьшается с удалением местоположения пеленгатора от границ сети и становится значительно малой при удалении на расстояние 0,4\*r от границы сети, где r – радиус области распределения узлов.

Однако, можно заметить, что при таком отдалении при максимальном возможном в данной модели количестве узлов n = 50, максимальном коэффициенте распространения сигнала k = 50 и минимальном уровне электромагнитного шума α вероятность раскрытия существования сети повышается до значения 0,332, что является высоким значением с учетом того, что при перемещении узлов сети функция U(x, y) постоянно переопределяется. Следовательно, данная зависимость справедлива с учетом дополнительных знаний о структуре сети и параметров области распределения.

Можно заметить, что полученные данные не отражают информации о полностью связных графах. В прошлом рассмотренном примере среднее количество компонент связности равно 2,059. Данная сеть является полностью работоспособной, поскольку вследствие перемещения узлов данные компоненты будут переопределяться, а в силу достаточного количества испытаний известно, что их число будет поддерживаться на заданном уровне. Таким образом, необходимо определить оптимальное количество компонент связности, когда сеть останется работоспособной, но вероятность раскрытия существования сети останется минимальной.

Для начала рассмотрим возможность распределения связных сетей на области. Результаты отражены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты выборки на основании нахождения вероятности генерации полностью связной сети со значениями больше 0.9

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N | α | k | ω | Смещение | Число компонент | Вер-ть связности | Вер-ть пеленга | Разность вероятностей |
| 30 | 2 | 40 | 5 | 6 | 1,097 | 0,907 | 1 | -0,093 |
| 25 | 2 | 50 | 5 | 6 | 1,07 | 0,933 | 1 | -0,067 |
| 45 | 2 | 30 | 5 | 6 | 1,055 | 0,948 | 1 | -0,052 |
| 35 | 2 | 40 | 5 | 6 | 1,052 | 0,95 | 1 | -0,05 |
| 40 | 2 | 35 | 5 | 6 | 1,053 | 0,95 | 1 | -0,05 |
| 50 | 2 | 30 | 5 | 6 | 1,044 | 0,957 | 1 | -0,043 |
| 30 | 2 | 45 | 5 | 6 | 1,039 | 0,961 | 1 | -0,039 |
| 45 | 2 | 35 | 5 | 6 | 1,027 | 0,973 | 1 | -0,027 |
| 35 | 2 | 45 | 5 | 6 | 1,027 | 0,974 | 1 | -0,026 |
| 30 | 2 | 50 | 5 | 6 | 1,025 | 0,975 | 1 | -0,025 |
| 40 | 2 | 40 | 5 | 6 | 1,02 | 0,981 | 1 | -0,019 |
| 50 | 2 | 35 | 5 | 6 | 1,014 | 0,986 | 1 | -0,014 |
| 40 | 2 | 45 | 5 | 6 | 1,009 | 0,991 | 1 | -0,009 |
| 45 | 2 | 40 | 5 | 6 | 1,007 | 0,993 | 1 | -0,007 |
| 35 | 2 | 50 | 5 | 6 | 1,005 | 0,995 | 1 | -0,005 |
| 40 | 2 | 50 | 5 | 6 | 1,005 | 0,995 | 1 | -0,005 |
| 45 | 2 | 45 | 5 | 6 | 1,004 | 0,996 | 1 | -0,004 |
| 50 | 2 | 40 | 5 | 6 | 1,005 | 0,996 | 1 | -0,004 |
| 45 | 2 | 50 | 5 | 6 | 1,001 | 0,999 | 1 | -0,001 |

В данной выборке даны результаты при значении смещения местоположения пеленгатора от центра области распределения узлов сети равным 6, то есть при его расстоянии от границ области на 1 единицу длины, или на 0,2\*r, где r – радиус области распределения. Во всех получившихся результатах степень затухания сигнала с увеличением расстояния α минимальна, то есть равна 2. На основании проведенных ранее исследований известно, что вероятности генерации связной сети и раскрытия существования сети повышаются при понижении параметра α. Однако, видно, что разность данных вероятностей в данном случае отрицательна, а вероятность пеленга абсолютно равна 1. Очевидно, что генерация полностью связных сетей в пределах рассматриваемых параметров приводит к точной пеленгации сети. Таким образом, степень затухания сигнала α сильнее коррелирует с вероятностью раскрытия существования сети, чем с вероятностью генерации связной сети.

Однако, рассмотрим случай с генерацией связного графа. Для нахождения оптимальных параметров рассмотрим худший случай – когда параметры сети и области распределения узлов данной мобильной сети в полную силу указывают на высокую вероятность раскрытия данной сети. На основе этих данных найдем значения удаления пеленгатора от границ области распределения мобильной сети.

В результате тестирования, было обнаружено, что подходящие значения смещения от границ области распределения лежат в интервале от 21 до 24 единиц длины. Для большей точности исследуем данный промежуток с шагом 0,1 единиц длины.

Параметры, при которых производилось тестирование: а) количество вершин n = 50;

б) степень затухания сигнала α = 2;

в) коэффициент распространения сигнала k = 50;

г) уровень электромагнитного шума ω = 5;

Результаты в графическом виде отражены на Рисунке 12.

Заметно, что начиная со значения смещения местоположения пеленгатора предполагаемого противника относительно центра распределения узлов мобильной сети равного 23,6 угроза раскрытия существования этой сети становится незначительной.

На основе этого факта можно говорить о том, что при генерации сетей в областях, где практически нет препятствий распространению сигнала, угроза пеленгации возрастает до 1.

Таким образом, необходимо узнать, какое количество узлов необходимо использовать при генерации сети, в случае, если известно примерное местоположение пеленгатора предполагаемого противника.

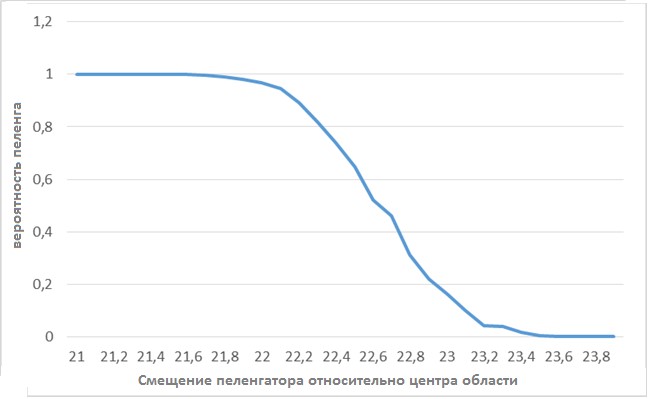


Рисунок 12 – График зависимости вероятности раскрытия существования мобильной сети от смещения пеленгатора относительно центра области

размещения мобильной сети – круга радиуса 5

Исследуем те же параметры области распределения, будем изменять лишь количество вершин и удаление пеленгатора от границ области. Начиная с 5 узлов с шагом 5, достигнем значения в 50 вершин. Будем искать те значения вероятности раскрытия существования сети, которые равны 0. Данные зависимости отражены на Рисунке 12.

На данном рисунке можно проследить линейную зависимость удаления пеленгатора от центра области распределения узлов мобильной компьютерной сети. Для подтверждения этих данных обратимся к регрессионному анализу.

Регрессионный анализ – анализ влияния одной или нескольких переменных на некоторую зависимую переменную. В данном случае найдем формулу, описывающую зависимость, представленную на Рисунке 13.

0

5

10

15

20

25

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Смещение пеленгатора

Количество узлов в мобильной сети

Рисунок 13 – График зависимости смещения местоположения пеленгатора предполагаемого противника от центра области распределения мобильной сети

от количества узлов в данной сети с учетом нулевой вероятности раскрытия

Для анализа используем средства языка R (версия 3.4.0). Считаем данные из полученного файла и проведем анализ на основании необходимых столбцов. После этого используем функцию lm(), на основании которой высчитываются зависимости между переменными. Вызов функции показан на Рисунке 14.

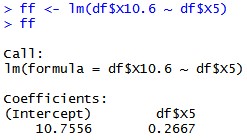


Рисунок 14 – Вызов функции регрессионного анализа. Поиск зависимости смещения пеленгатора относительно центра области распределения узлов сети от количества узлов сети для нулевой вероятности ее раскрытия Проанализируем данные результаты. Функция вызывалась для поиска зависимости столбца со смещениями пеленгатора относительно центра области (df$X10.6) от значений в столбце с указанием на количество узлов сети (df$X5). Коэффициент Intercept указывает на свободный коэффициент, то есть свободное слагаемое в формуле зависимости. Коэффициент у df$X5 указывает на множитель при значении переменной, отвечающей за количество узлов сети.

Таким образом, формула зависимости получена следующая: Rp = 0,2667 \* n + 10,7556,

где Rp – смещение пеленгатора относительно центра мобильной сети; n – количество узлов в мобильной сети.

Рассмотрим точность полученной формулы. Для этого вызовем функцию summary() от данной формулы. Результаты вызова показаны на Рисунке 15.

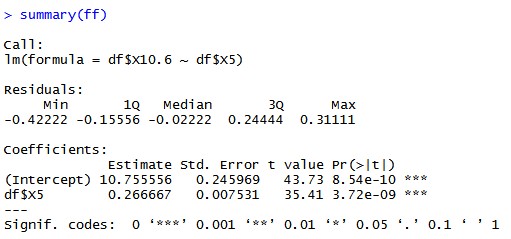


Рисунок 15 – Результат вызова функции summary от получившейся формулы зависимости

Тут нас интересуют значения в столбце Pr(>|t|). Они отражают коэффициент при значении t value, чем меньше который, тем точнее полученный результат и сильнее данная зависимость. Данные значения для свободного члена и множителя у переменной n имеют множители 10-10 и 10-9, что указывает на высокую линейную зависимость.

Пользуясь данной формулой, при масштабировании параметров k, ω и α на реальные данные, известные об области будущего распределения узлов мобильной распределенной компьютерной сети, при наличии информации о возможном удалении пеленгатора предполагаемого противника, возможно высчитать количество узлов, которое позволит остаться данной сети незамеченной.

Кроме того, на основании данной выборки проследим за связностью, генерируемой при таких параметрах сети. Данные представлены на Рисунке 16.

0

2

0

,

4

0

,

6

,

0

8

,

0

1

1

,

2

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Вероятность связности сети

Количество узлов в мобильной сети

Рисунок 16 – График зависимости вероятности генерации связной сети от количества вершин для параметров, гарантирующих лучшую передачу сигнала

Рассмотрим в дополнение зависимость количества компонент связности от количества вершин при таких параметрах. Она представлена в графическом виде на Рисунке 17.

На данных графиках видно, что с параметрами, способствующими уверенной передаче сигнала, на данной области распределения уже начиная с распределения 15 узлов мобильной сети данная сеть показывает стабильные результаты – менее двух компонент связности и вероятность полной связности сети более 0,5. Таким образом, в ситуации, способствующей уверенной передаче сигнала, масштабируя параметры области на реальные значения, имеет смысл размещать 15 и более узлов в данной сети.

0

0

,

5

1

,

5

1

2

2

,

5

3

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Количество компонент связности

Количество узлов в мобильной сети

Рисунок 17 – График зависимости количества компонент связности от количества вершин для параметров сети, гарантирующих лучшую передачу сигнала

Таким образом, можно заметить, что при возрастании коэффициента распространения сигнала и уменьшении степени затухания этого сигнала в области распределения узлов мобильной сети возможно распределение связной сети в условиях достаточного отдаления от предполагаемого местоположения пеленгующего устройства противника. Найденные закономерности указывают на возможность размещения работоспособной сети в области со средними значениями коэффициентов распространения сигнала мобильной сети даже в условиях относительно малого удаления пеленгатора предполагаемого противника (менее одного радиуса области распределения узлов мобильной сети) при генерации мобильной сети с числом компонент связности в промежутке от 2 до 5 компонент.

При дальнейшем регрессионном исследовании зависимости угрозы раскрытия существования мобильной сети от основных параметров области, в которой распределяются узлы мобильной сети, и параметров самой сети линейных зависимостей обнаружено не было. В получаемых формулах множители при слагаемых имеют малые значения (степень 10 при данных множителях не превосходит -3), поэтому в случае реальной развертки сети при прогнозировании ее работоспособности следует руководствоваться полученными выборками и зависимостями, представленными в графическом виде.

# Результаты

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

а) размещение работоспособной сети в области со средними значениями степени затухания сигнала при увеличении расстояния между передатчиком и приемником α, коэффициента распространения сигнала k и уровнем общего электромагнитного шума ω в данной области возможно на расстоянии не менее 0,4\*r границы сети от возможного местоположения пеленгатора предполагаемого противника, где r – радиус области распределения узлов мобильной распределенной компьютерной сети;

б) угроза раскрытия существования мобильной сети имеет линейную зависимость только от количества вершин в мобильной сети, существование которой необходимо определить пеленгатору предполагаемого противника, в остальных случаях зависимость нелинейная.

в) генерация связной сети при рассматриваемых значениях параметров, максимальных для улучшения распространения сигнала, возможна с учетом расстояния от пеленгатора противника, удовлетворяющим следующей формуле:

Rp = 0,2667 \* n + 10,7556, где Rp – смещение пеленгатора относительно центра мобильной сети; n – количество узлов в мобильной сети,

то есть между вероятностью раскрытия существования мобильной сети и количеством узлов приемопередатчиков в данной сети существует прямая линейная зависимость.

Поскольку данная выше формула указана для параметров, способствующих максимальному распространению сигнала, при иных параметрах необходимо руководствоваться либо масштабированием рассматриваемых параметров при рассмотрении полученной в результате работы программы, моделирующей расположение мобильной сети и ее пеленгацию, выборкой данных, либо рассматривать найденные нелинейные зависимости между параметрами сети и области распределения и угрозой раскрытия существования сети;

г) расстояние между границей сети и пеленгатором предполагаемого противника является наиважнейшим параметром для анализа угрозы раскрытия существования мобильной сети;

д) степень затухания сигнала α активнее коррелирует с угрозой раскрытия существования мобильной сети, чем с вероятностью генерации связной сети, то есть при уменьшении на области значений параметров, препятствующих свободному распространению сигнала, вероятность раскрытия растет быстрее, чем растут параметры связности сети, являющиеся основными параметрами, отвечающими за ее работоспособность;

е) так как обеспечение связности сети заключается в расположении либо ограниченного количества вершин в области при параметрах, слабо препятствующих распространению электромагнитного шума, либо избыточного количества вершин в пределах данной области распределения, оптимальным является развертка мобильной сети с предполагаемым разбиением ее на малое количество отдельных компонент связности. Данный подход может гарантировать высокую работоспособность сети вкупе с малой угрозой раскрытия существования данной сети. При таком подходе количество компонент может варьироваться в среднем от 2 до 5, а проблемы при передаче сообщений из-за отсутствия маршрутов между узлами сети будут нивелироваться в результате передвижения узлов в пределах области распределения.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При написании данной выпускной квалификационной работы бакалавра была исследована проблема распределения узлов мобильной сети в ограниченной круговой области с поддержанием ее достаточной работоспособности при низкой вероятности раскрытия существования данной сети пеленгатором предполагаемого противника.

В ходе исследования распределения данной сети была написана программа, моделирующая распределение узлов данной сети и находящая количество компонент связности с использованием основных графовых алгоритмов. В результате моделирования были получены результаты, описывающие распространение электромагнитного поля за пределами данной сети, уровень которого может зарегистрировать пеленгатор предполагаемого противника.

В результате работы программы были собраны и сохранены для обработки данные, содержащие усредненные в результате достаточного количества испытаний значения, описывающие работоспособность сети и угрозу раскрытия ее существования, такие как процент генерации связной сети, количество отдельных связных компонент и вероятность раскрытия существования мобильной компьютерной сети удаленным пеленгующим устройством.

Рассмотренные параметры, такие как коэффициент распространения сигнала, степень затухания сигнала, уровень электромагнитного шума, количество узлов сети и предполагаемое расстояние от границ сети до пеленгатора рассмотрены на достаточных интервалах, отражающих ситуации для областей как со слабым, так и с сильным препятствием распространению сигналов между узлами. В результате полного перебора данных значений результирующие данные отражают большое количество разнообразных вариаций области распределения и мобильной сети.

Полученные данные были проанализированы, зависимости между параметрами распределяемой сети и области распределения ее узлов были рассмотрены и представлены в виде таблиц, графиков и формул, используя которые при будущей развертке сети есть возможность при достаточном исследовании области распределения узлов данной сети составить прогноз, отражающий возможную работоспособность данной сети и угрозу раскрытия существования данной сети вкупе с уровнем создаваемого мобильной сетью электромагнитного излучения. При масштабировании рассматриваемых параметров есть возможность подобрать такую конфигурацию сети, включающую количество вершин и радиус области распределения, при которых сеть будет создавать ограниченное электромагнитное поле при сохранении своей работоспособности для достижения поставленных перед данной мобильной сетью целей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Azzedine Boukerche. Algorithms and protocols for wireless, mobile ad hoc networks. - New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – С. 495
2. Зыков А. А. Основы теории графов. // М.: Наука, 1986. — С. 456.
3. Королюк В.С., Портенко Н.И.,Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. // М.: Наука, 1985. — С. 640
4. Миков А. И. Связность автономных беспроводных компьютерных сетей в местностях с плохой инфраструктурой.// Экологический вестник научных центров ЧЭС. - 2014. - No 1. - C. 70–75
5. Миков А.И. Связность автономных беспроводных компьютерных сетей в местностях с плохой инфраструктурой. // Экологический вестник научных центров ЧАЭС, 2014, № 1, с. 70 – 75.
6. Миков А.И., Мезенцева А.С. Характеристики геометрических графов, моделирующих ad hoc сети. //Информатизация и связь, 2012, № 5 , 85 – 88.
7. Харари Ф. Теория графов. М.: Эдиториал УРСС, 2003.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А Код программы

//файл Program, точка входа using System.IO;

namespace AdHoc

{

class Program

{

static void Main(string[] args)

{

for (; Constants.NODES\_COUNT <= 50; Constants.NODES\_COUNT += 5)

{

Constants.DEGREE\_ALPHA = 2;

for (; Constants.DEGREE\_ALPHA <= 6; Constants.DEGREE\_ALPHA += 1)

{

Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K = 0.0;

for (; Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K <= 50;

Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K += 5)

{

Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA = 0.0;

for (; Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA <= 50;

Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA += 5)

{

Constants.PELENGATOR\_OFFSET = 4.0;

for (; Constants.PELENGATOR\_OFFSET <= 8.0;

Constants.PELENGATOR\_OFFSET += 0.5)

{

int componentsCount = 0;

int adjacency = 0; int strongComponents = 0; int peleng = 0;

for (int counter = 0; counter < Constants.NUMBER\_OF\_TESTS; counter++)

{

Network network = new Network();

componentsCount += network.GetComponentsCount(); strongComponents += network.GetStrongComponents(); if (network.GetComponentsCount() == 1) adjacency++;

if (network.ComputePeleng())

peleng++; }

File.AppendAllText("result.txt", Constants.NODES\_COUNT + ";" +

Constants.DEGREE\_ALPHA + ";" + Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K +

";" +

Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA + ";" +

Constants.PELENGATOR\_OFFSET + ";" + 1.0 \* componentsCount /

Constants.NUMBER\_OF\_TESTS + ";" +

1.0 \* strongComponents / componentsCount + ";" +

1.0 \* adjacency / Constants.NUMBER\_OF\_TESTS + ";" +

1.0 \* peleng / Constants.NUMBER\_OF\_TESTS + "\r\n");

}

}

}

}

}

}

} }

//файл необходимых параметров Constants namespace AdHoc

{

public static class Constants

{

public static int REGION\_RADIUS = 5; public static int NODES\_COUNT = 5; public static int NUMBER\_OF\_TESTS = 100000; public static int DEGREE\_ALPHA = 2; public static double COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K = 10.0; public static double ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA = 0.0; public static double PELENGATOR\_OFFSET = 4.0;

}

}

//файл класса получения случайных значений Randomizer using System;

namespace AdHoc

{ public static class Randomizer

{

private static Random random = new Random();

public static double GetRandomDouble()

{

return random.NextDouble();

}

public static int GetRandomInt()

{

return random.Next();

}

public static double GetRandomDouble(double min, double max)

{

return random.NextDouble() \* (max - min) + min;

}

public static int GetRandomInt(int min, int max)

{

return random.Next(min, max);

}

}

}

//файл класса пеленгатора Pelengator

namespace AdHoc

{

class Pelengator

{ private double x; private double y;

public double X

{ get {

return this.x;

} private set {

this.x = value;

}

}

public double Y

{ get {

return this.y;

} private set {

this.y = value;

}

}

public Pelengator()

{ double x = 0;

double y = Constants.PELENGATOR\_OFFSET;

this.x = x; this.y = y;

}

}

}

//файл класса узла сети Node namespace AdHoc

{ class Node {

private double x; private double y;

public double X

{ get {

return this.x;

} private set

{

this.x = value;

}

}

public double Y

{ get {

return this.y;

} private set

{

this.y = value;

}

}

public Node(double X, double Y)

{ this.x = X; this.y = Y;

}

}

}

//файл класса сети Network using System;

using System.Collections.Generic;

namespace AdHoc

{

class Network

{

private List<Node> nodesList = new List<Node>(0);

private int[,] adjacencyMatrix;

List<ConnectivityComponent> connectivityComponentsList = new

List<ConnectivityComponent>(0);

public Network()

{

CreateNetwork(); ComputeAdjacencyMatrix();

ComputeConnectivityComponentList();

}

private void CreateNetwork()

{

for (int nodeCount = 0; nodeCount < Constants.NODES\_COUNT; )

{

double x = Randomizer.GetRandomDouble((-1.0) \* Constants.REGION\_RADIUS, Constants.REGION\_RADIUS);

double y = Randomizer.GetRandomDouble((-1.0) \* Constants.REGION\_RADIUS, Constants.REGION\_RADIUS);

if (Math.Sqrt(x \* x + y \* y) < Constants.REGION\_RADIUS)

{

this.nodesList.Add(new Node(x, y));

nodeCount++;

}

}

}

private void ComputeAdjacencyMatrix()

{

this.adjacencyMatrix = new int[Constants.NODES\_COUNT, Constants.NODES\_COUNT]; for (int i = 0; i < Constants.NODES\_COUNT; i++) for (int j = 0; j < Constants.NODES\_COUNT; j++) this.adjacencyMatrix[i, j] = 0;

for (int i = 0; i < Constants.NODES\_COUNT; i++) for (int j = i + 1; j < Constants.NODES\_COUNT; j++)

{

double xDistance = nodesList[i].X - nodesList[j].X; double yDistance = nodesList[i].Y - nodesList[j].Y; double distance = Math.Sqrt(xDistance \* xDistance + yDistance \* yDistance); if (Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K \* Math.Pow(distance, (1.0) \* Constants.DEGREE\_ALPHA) >=

Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA)

{

this.adjacencyMatrix[i, j] = 1;

}

if (Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K \* Math.Pow(distance, (1.0) \* Constants.DEGREE\_ALPHA) >=

Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA)

{

this.adjacencyMatrix[j, i] = 1;

}

}

}

private void ComputeConnectivityComponentList()

{

List<int> notUsedNodes = new List<int>(0); for (int i = 0; i < Constants.NODES\_COUNT; i++)

notUsedNodes.Add(i); while (notUsedNodes.Count != 0) {

int start = notUsedNodes[0];

if (notUsedNodes.Count == 1)

{

connectivityComponentsList.Add(new ConnectivityComponent(start)); notUsedNodes.Remove(start);

} else

{

bool[] used = new bool[Constants.NODES\_COUNT];

for (int j = 0; j < Constants.NODES\_COUNT; j++) used[j] = false;

ConnectivityComponent component = DFS(start, used); connectivityComponentsList.Add(component); List<int> comp = component.GetComponent();

for (int k = 0; k < comp.Count; k++)

{

notUsedNodes.Remove(comp[k]);

}

}

}

}

private ConnectivityComponent DFS(int startNode, bool[] used)

{

used[startNode] = true;

ConnectivityComponent result = new ConnectivityComponent(startNode); for (int i = 0; i < Constants.NODES\_COUNT; i++)

{

if (!used[i] && this.adjacencyMatrix[startNode, i] == 1)

{

ConnectivityComponent concatenatedResult = DFS(i, used);

if (adjacencyMatrix[i, startNode] != 1) result.StrongConnectivity = false;

result.Concat(concatenatedResult);

} }

return result;

}

public bool ComputePeleng()

{

Pelengator pelengator = new Pelengator(); double signal = 0.0;

for (int i = 0; i < this.nodesList.Count; i++)

{

double xDistance = this.nodesList[i].X - pelengator.X; double yDistance = this.nodesList[i].Y - pelengator.Y;

double distance = Math.Sqrt(xDistance \* xDistance + yDistance \* yDistance); signal += Constants.COEFFITIENT\_OF\_PROPORTIONALITY\_K \* Math.Pow(distance, (-1.0) \* Constants.DEGREE\_ALPHA);

}

if (signal > Constants.ELECTROMAGNETIC\_NOISE\_LEVEL\_OMEGA)

return true; else

return false;

}

public int GetComponentsCount()

{

return this.connectivityComponentsList.Count;

}

public int GetStrongComponents()

{

int count = 0;

for (int i = 0; i < connectivityComponentsList.Count; i++)

if (connectivityComponentsList[i].StrongConnectivity == true) count++; return count;

}

}

}

//файл класса компоненты связности ConnectivityComponent

using System.Collections.Generic;

namespace AdHoc

{

public class ConnectivityComponent

{

private List<int> component; private bool strongConnectivity;

public bool StrongConnectivity

{ get

{

return this.strongConnectivity;

} set

{

this.strongConnectivity = value;

}

}

public ConnectivityComponent()

{

component = new List<int>(0);

strongConnectivity = true;

}

public ConnectivityComponent(int node)

{

component = new List<int> { node }; strongConnectivity = true;

}

public void Add(int node)

{

if (!component.Contains(node))

component.Add(node);

}

public void Concat(ConnectivityComponent concatenatedComponent)

{

List<int> nodes = concatenatedComponent.GetComponent();

for (int i = 0; i < nodes.Count; i++)

Add(nodes[i]);

}

public List<int> GetComponent()

{

return this.component;

}

}

}