СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ст. гр. ИБ-116 |  | И.М. Куликов |
|  | (подпись, дата) |  |

РЕФЕРАТ

Отчет 29 с., 0 кн., 6 рис., 0 табл., 36 источн., 0 прил.

Исследование робастности в беспроводных сенсорных сетях

СОДЕРЖАНИЕ

[СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ 2](#_Toc42360302)

[РЕФЕРАТ 3](#_Toc42360303)

[ВВЕДЕНИЕ 5](#_Toc42360304)

[ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ 6](#_Toc42360305)

[1. Описание способов генерации графов 6](#_Toc42360306)

[2. Описание способов атаки на граф 6](#_Toc42360307)

[3. Тестирование 8](#_Toc42360308)

[3.1 Граф Барабаши-Альберт 8](#_Toc42360309)

[3.2 Граф Ватца и Строгаца 15](#_Toc42360310)

[3.3 Случайный граф 23](#_Toc42360311)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 28](#_Toc42360312)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 29](#_Toc42360313)

ВВЕДЕНИЕ

Под робастностью подразумевается устойчивость системы к атакам и случайным отказам. Робастная сеть (граф) может выдерживать потерю части компонентов и поддерживать связность при отказе узлов, будь то случайное или целенаправленное событие.

Другими словами, сеть робастна, если она продолжает выполнять свои основные функции при наличии внутренних или внешних ошибок.

Рассматривая робастность, нельзя игнорировать тот факт, что большинство систем спроектированы таким образом, что при отказе узла или нарушении соединения между узлами трафик просто обойдет эту часть сети.

Различают функциональную и структурную робастность. Под функциональной робастностью будем понимать устойчивость системы к различным помехам или шуму. Под структурной робастностью системы подразумеваем ее устойчивость к удалению узлов или ребер, их перемещению и другим изменениям топологии сети. Топология сети – одна из важнейших и самых уязвимых частей системы. Исследование структурной робастности направлено на то, чтобы повысить отказоустойчивость сети путем анализа недостатков ее структуры.

Топология сети играет ключевую роль в обеспечении ее устойчивости против преднамеренных атак или случайных отказов. Другими словами, расположение узлов сети и их соединение между собой и конечная структура графа влияют на производительность системы при сбоях в ее работе. Преднамеренная атака – дестабилизация системы злоумышленником, выведение компонентов сети из строя. Под случайными отказами будем понимать отказ узла или нарушение соединения между узлами сети. Очевидно, что отказ одного узла в большинстве случаев не повлияет на целостность системы. Но отказ нескольких узлов может повлиять на нормальное функционирование остальных узлов, что, в свою очередь, может привести к тому, сеть распадется на несколько несвязанных кластеров, которые не могут взаимодействовать между собой. Чем больше узлов мы выведем из строя, тем более высока вероятность навредить сети. Возникает вопрос, сколько узлов должны отказать, чтобы сеть распалась на изолированные компоненты. По существу, это вопрос о робастности, т.е. надежности сети: чем больше число узлов, отказ которых разбивает сеть на кластеры, тем сеть надежнее. Нетрудно заметить, что вопрос о робастности сети – это, в свою очередь, вопрос о ее связности.

Исследование робастности может помочь спроектировать такую сеть, которая будет продолжать работу после отказа одного или нескольких компонентов с возможным уменьшением пропускной способности или увеличением времени отклика. Это означает, что система не прекратит свою работу в случае отказа части сети.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Описание способов генерации графов

На данный момент было использовано несколько моделей графа:

1. Случайный граф – для постройки графа требуются два значения – количество вершин (N) и количество связей (S). Сначала в граф добавляются все вершины, которые существуют, после этого для каждой вершины берётся случайное число (P), которое меньше заданного S, и к ней присоединяются P вершин. Количество таких итераций прямо пропорционально заданному количеству вершин.
2. Безмасштабная сеть Барабаши-Альберт - в своих работах, авторы идеи, описали статистики сети Интернет, которые легли в основу науки о росте этой сети. Большинство реальных сетей имеют похожую топологию. Опишем алгоритм построения сети. Граф строится с начальной сетки с , при этом степень каждого узла в начальной сети должна быть не меньше единицы, иначе она всегда будет отделена от остальной части сети. В каждый момент времени в граф добавляется новый узел. Каждый новый узел соединяется с существующими узлами с вероятностью, пропорционально числу связей этих узлов.

Формально, вероятность того, что новый узел соединится с узлом , равна

,

где – степень -го узла, в знаменателе суммируются степени всех уже

существующих узлов.

Узлы с наибольшей степенью, как правило, накапливают еще больше связей, тогда

как узлы с небольшим числом связей вряд ли будут выбраны для присоединения

новых узлов. Такая модель называется моделью предпочтительного

присоединения.

1. Модель Ватца и Строгаца – одна из версий графа типа “Мир тесен”, на вход подаются 3 параметра: N – количество вершин графа, k - каждый узел соединен со своими `k` ближайшими соседями в кольцевой топологии, P – вероятность перемонтирования ребра.
2. Описание способов атаки на граф

В качестве атак на граф были использованы:

1. Случайная атака – удалялись случайно выбранные вершины графа.
2. Удаление по максимальной степени связности – удалялись вершины, которые имеют наибольшую связность.
3. Удаление по минимальной степени связности – выбиралась вершина, которая имеет наименьшую связность, после этого удалялись все её связи.
4. Удаление по коэффициенту центральности - определяются наиболее важные вершины графа.
5. Удаление по коэффициенту центральности с перерасчётом – аналогичен простому удалению по коэффициенту центральность, однако она пересчитывалась после каждой удаленной вершины.

Удаление вершин происходит до тех пор, пока граф остается быть односвязным.

В качестве выходных результатов имеем:

А) Количество удаленных вершин – количество вершин, которое потребовалось, чтобы граф перестал быть односвязным.

Б) Подсчёт “Интактности” - число оставшихся маршрутов между вершинами после атаки.

В) Количество ошибок – некоторые атаки не всегда дают положительный результат, после них остается один граф, который имеет одну вершину.

Г) “Успешность” атаки – нельзя сказать, что атака получилась успешной, если интактность получилась низкой, а количество удаленных вершин стремится к общему числу вершин графа. Поэтому этот параметр выводит общий результат атаки, который ссылается и на интактность и на количество удаленных вершин.

1. Тестирование

Процесс тестирования занимает очень много времени. Для получения средних результатов каждый тест проводился 1000 раз. В каждом тесте использовался граф с количеством вершин равным 100. После выполнения каждого теста, связность графа увеличивалась на 5 соединений. Тест начинался с количество связей равным 5.

* 1. Граф Барабаши-Альберт
     1. Случайная атака

Таблица 1. Результаты случайной атаки

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Number of edges to attach | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 51,413 | 94,80355941 | 51,258646 | 0 |
| 10 | 75,35951662 | 87,78555939 | 33,84522678 | 0,7 |
| 15 | 84,01431493 | 80,48111831 | 32,38433981 | 2,2 |
| 20 | 88,8654661 | 73,73819212 | 34,47221187 | 5,6 |
| 25 | 91,05504587 | 69,3925505 | 36,81458131 | 12,8 |
| 30 | 92,19423559 | 67,18671833 | 38,05771862 | 20,2 |
| 35 | 92,93741851 | 65,45720002 | 39,16576807 | 23,3 |
| 40 | 93,36127168 | 64,22913814 | 40,03485984 | 30,8 |
| 45 | 92,97592068 | 64,73853266 | 39,80875322 | 29,4 |
| 50 | 93,18730159 | 63,65196219 | 40,68445402 | 37 |
| 55 | 92,9251497 | 63,13967804 | 41,32735966 | 33,2 |
| 60 | 92,75073746 | 62,09000369 | 42,41106368 | 32,2 |
| 65 | 92,30389222 | 63,39577218 | 41,48323478 | 33,2 |
| 70 | 91,53453039 | 62,17713606 | 43,0864505 | 27,6 |
| 75 | 90,7601626 | 61,0596565 | 44,58215648 | 26,2 |
| 80 | 90,02470741 | 59,72115793 | 46,23620231 | 23,1 |
| 85 | 86,84903382 | 59,25871494 | 48,53437862 | 17,2 |
| 90 | 83,17416378 | 55,41316813 | 53,91056078 | 13,3 |
| 95 | 71,52016985 | 53,6216383 | 61,64971321 | 5,8 |

Рисунок 1. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на максимально-связные вершины

Таблица 2. Результаты атаки на максимально-связные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Number of edges to attach | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 19,18 | 97,17432388 | 81,36196468 | 0 |
| 10 | 45,428 | 95,53616139 | 56,5998326 | 0 |
| 15 | 62,006 | 93,37318585 | 42,10302238 | 0 |
| 20 | 72,55995935 | 90,85277016 | 34,0772669 | 1,6 |
| 25 | 76,70356704 | 89,50139324 | 31,34923884 | 18,7 |
| 30 | 72,25725338 | 91,86138806 | 33,62348407 | 48,3 |
| 35 | 62,95098039 | 94,18969614 | 40,70666285 | 49 |
| 40 | 54,94672131 | 95,25677095 | 47,65952754 | 51,2 |
| 45 | 50,26894866 | 95,64873061 | 51,91838872 | 59,1 |
| 50 | 46,40571429 | 96,08374701 | 55,41165089 | 65 |
| 55 | 41,95951417 | 96,40955613 | 59,54701863 | 75,3 |
| 60 | 37,19230769 | 96,81061704 | 63,99389743 | 87 |
| 65 | 32,67857143 | 97,07221046 | 68,27818837 | 97,2 |
| 70 | 28,66666667 | 97,23544966 | 72,12583776 | 99,4 |
| 75 | 100 | 100 | 0 | 100 |
| 80 | 100 | 100 | 0 | 100 |
| 85 | 100 | 100 | 0 | 100 |
| 90 | 100 | 100 | 0 | 100 |
| 95 | 100 | 100 | 0 | 100 |

Рисунок 2. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на минимально-связную вершину

Таблица 3. Результаты атаки на минимальную вершину

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Number of edges to attach | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 4,194 | 97,93388372 | 95,89265292 | 0 |
| 10 | 7,467 | 97,86025292 | 92,69277491 | 0 |
| 15 | 9,913 | 97,80132187 | 90,30495496 | 0 |
| 20 | 11,968 | 97,74995847 | 88,30128497 | 0 |
| 25 | 13,413 | 97,7121193 | 86,89387344 | 0 |
| 30 | 15,083 | 97,66830417 | 85,26868968 | 0 |
| 35 | 16,001 | 97,64286628 | 84,37616497 | 0 |
| 40 | 16,827 | 97,61973647 | 83,57352694 | 0 |
| 45 | 17,372 | 97,60414826 | 83,04420736 | 0 |
| 50 | 17,783 | 97,59334182 | 82,64497602 | 0 |
| 55 | 17,945 | 97,58931701 | 82,48759706 | 0 |
| 60 | 17,475 | 97,6030881 | 82,94386035 | 0 |
| 65 | 16,755 | 97,62416175 | 83,6430717 | 0 |
| 70 | 15,728 | 97,65328483 | 84,64109136 | 0 |
| 75 | 14,015 | 97,6998571 | 86,30736503 | 0 |
| 80 | 12,036 | 97,75139722 | 88,23464183 | 0 |
| 85 | 9,452 | 97,81291641 | 90,75472314 | 0 |
| 90 | 6,423 | 97,81758445 | 93,71717655 | 0 |
| 95 | 3,225 | 96,55758803 | 96,88601779 | 0 |

Рисунок 3. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на центральность

Таблица 4. Результаты атаки на центральные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Number of edges to attach | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 17,218 | 97,21845107 | 83,2609271 | 0 |
| 10 | 42,91 | 95,72627017 | 58,92385747 | 0 |
| 15 | 58,702 | 93,51968622 | 45,10207379 | 0 |
| 20 | 68,043 | 90,90116238 | 38,14812208 | 0 |
| 25 | 71,212 | 89,74399057 | 36,09150943 | 0 |
| 30 | 67,535 | 91,74098711 | 38,04272435 | 0 |
| 35 | 57,706 | 94,48533387 | 45,47629323 | 0 |
| 40 | 49,675 | 95,35932945 | 52,6302531 | 0 |
| 45 | 44,311 | 95,72421887 | 57,58364138 | 0 |
| 50 | 40,367 | 95,79906301 | 61,32879224 | 0 |
| 55 | 36,519 | 96,1311176 | 64,89387716 | 0 |
| 60 | 32,824 | 95,99596629 | 68,49028403 | 0 |
| 65 | 29,217 | 95,85698875 | 71,9934636 | 0 |
| 70 | 25,192 | 95,82402056 | 75,86001274 | 0 |
| 75 | 21,073 | 95,53655271 | 79,86758225 | 0 |
| 80 | 16,888 | 95,2167656 | 83,91979262 | 0 |
| 85 | 12,492 | 94,66149445 | 88,17488611 | 0 |
| 90 | 8,094 | 92,22658206 | 92,53518045 | 0 |
| 95 | 3,673 | 93,47280509 | 96,56674387 | 0 |

Рисунок 4. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на центральность с пересчётом

Таблица 5. Результаты атаки на центральные вершины, с их перерасчётом

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Number of edges to attach | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 17,839 | 97,09498073 | 82,67922639 | 0 |
| 10 | 42,872 | 94,42746222 | 59,5170584 | 0 |
| 15 | 56,525 | 90,58654142 | 48,79595746 | 0 |
| 20 | 61,291 | 90,22487855 | 44,70026969 | 0 |
| 25 | 58,154 | 94,51413248 | 45,0362514 | 0 |
| 30 | 54,505 | 94,9981188 | 48,22127535 | 0 |
| 35 | 51,104 | 95,31742216 | 51,28898458 | 0 |
| 40 | 47,931 | 95,44270711 | 54,25335606 | 0 |
| 45 | 44,414 | 95,67481316 | 57,50698848 | 0 |
| 50 | 40,724 | 95,872206 | 60,95700283 | 0 |
| 55 | 37,138 | 95,75239858 | 64,43947422 | 0 |
| 60 | 33,385 | 95,93127074 | 67,97334526 | 0 |
| 65 | 29,509 | 95,57780772 | 71,79594472 | 0 |
| 70 | 25,517 | 95,47208958 | 75,6383869 | 0 |
| 75 | 21,357 | 95,16295126 | 79,6760485 | 0 |
| 80 | 17,051 | 95,02610227 | 83,7970993 | 0 |
| 85 | 12,618 | 94,34505383 | 88,09554111 | 0 |
| 90 | 8,162 | 91,90891038 | 92,49839474 | 0 |
| 95 | 3,671 | 93,39815398 | 96,57135377 | 0 |

Рисунок 5. Графическое представление полученных результатов

* 1. Граф Ватца и Строгаца
     1. Случайная атака

Таблица 6. Результаты случайной атаки

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The number of neighbors at a node in a ring topology | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 21,913 | 89,92626848 | 80,29445679 | 0 |
| 10 | 61,303 | 83,22767717 | 48,97893706 | 0 |
| 15 | 72,416 | 79,40558782 | 42,49764952 | 0 |
| 20 | 81,712 | 73,07117445 | 40,29208194 | 0 |
| 25 | 85,69138277 | 70,50573547 | 39,58266035 | 0,2 |
| 30 | 89,45621181 | 66,91424373 | 40,14105239 | 1,8 |
| 35 | 91,13463515 | 65,93718249 | 39,90838931 | 2,7 |
| 40 | 92,95995551 | 63,56091494 | 40,91380175 | 10,1 |
| 45 | 93,93240093 | 61,6994041 | 42,04426837 | 14,2 |
| 50 | 94,95479452 | 60,21095496 | 42,82681143 | 27 |
| 55 | 95,510699 | 58,80212457 | 43,8376798 | 29,9 |
| 60 | 96,19243421 | 57,18488112 | 44,99247085 | 39,2 |
| 65 | 96,42460317 | 56,95588986 | 45,08050922 | 49,6 |
| 70 | 96,88770053 | 55,17741642 | 46,53987002 | 62,6 |
| 75 | 97,16510903 | 54,0879197 | 47,44541385 | 67,9 |
| 80 | 97,47826087 | 52,68067633 | 48,6477929 | 77 |
| 85 | 97,57142857 | 52,26488095 | 49,00440901 | 83,2 |
| 90 | 97,65306122 | 51,74319728 | 49,47118388 | 90,2 |
| 95 | 97,84 | 50,94444444 | 50,15595556 | 95 |

Рисунок 6. Графическое представление полученных результатов

Количество удаленных вершин растёт экспоненциально, это происходит в результате того, что атака не направлена на определенные вершины, из-за чего чтобы граф перестал быть односвязным ей приходится удалять всё больше и больше вершин. Количество ошибок также растёт вместе с количеством связей между вершинами, это также связано с тем, что атака не направлена на определенные вершины, а с ростом количества связей между ними ей всё труднее разложить граф на несколько подграфов. Успешность данной атаки сложно определить из-за того, что с ростом количества связей между вершинами увеличивается и количество ошибок, поэтому кривая, показывающая, что после определенного момента успешность растёт – это связано с тем, что с каждой итерацией удаляется больше вершин, это означает, что интактность уже не особого значения.

* + 1. Атака на максимально-связные вершины

Таблица 7. Результаты атаки на максимально-связные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The number of neighbors at a node in a ring topology | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 14,022 | 83,76098796 | 88,25503427 | 0 |
| 10 | 43,075 | 88,2644873 | 61,9800721 | 0 |
| 15 | 62,485 | 79,86626012 | 50,09556736 | 0 |
| 20 | 75,728 | 77,86352102 | 41,03551281 | 0 |
| 25 | 81,56212425 | 73,21454082 | 40,28466525 | 0,2 |
| 30 | 86,86130653 | 69,6851895 | 39,47053394 | 0,5 |
| 35 | 89,28744939 | 68,12857664 | 39,16973161 | 1,2 |
| 40 | 91,66737064 | 65,5163634 | 39,94287233 | 5,3 |
| 45 | 92,89027149 | 64,34303119 | 40,23158364 | 11,6 |
| 50 | 94,36341757 | 61,85902122 | 41,6277135 | 16,9 |
| 55 | 94,95951417 | 60,24486911 | 42,79176498 | 25,9 |
| 60 | 95,6384 | 58,59315972 | 43,96243954 | 37,5 |
| 65 | 96,17702448 | 57,95728549 | 44,25840735 | 46,9 |
| 70 | 96,55282555 | 55,96211781 | 45,96699402 | 59,3 |
| 75 | 96,80952381 | 55,7066398 | 46,07066728 | 64,3 |
| 80 | 97,0390625 | 54,77264916 | 46,84913475 | 74,4 |
| 85 | 97,33505155 | 53,59994273 | 47,82846812 | 80,6 |
| 90 | 97,74390244 | 51,16802168 | 49,98637881 | 91,8 |
| 95 | 97,76470588 | 51,30718954 | 49,83967705 | 98,3 |

Рисунок 7. Графическое представление полученных результатов

Атака на максимальную связность очень схожа со случайной атакой, однако здесь графики имеют более плавный рост (падение). Успешность этой атаки то растёт, то падает.

* + 1. Атака на минимально-связную вершину

Таблица 8. Результаты атаки на минимальную вершину

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The number of neighbors at a node in a ring topology | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 2,417 | 97,9714149 | 97,6320309 | 0 |
| 10 | 7,542 | 97,86017113 | 92,61938589 | 0 |
| 15 | 11,129 | 97,77476632 | 89,11864626 | 0 |
| 20 | 16,551 | 97,63189715 | 83,8409447 | 0 |
| 25 | 20,251 | 97,52338219 | 80,25053987 | 0 |
| 30 | 25,788 | 97,34104257 | 74,89769194 | 0 |
| 35 | 29,535 | 97,20157291 | 71,29151544 | 0 |
| 40 | 35,237 | 96,95898915 | 65,83456099 | 0 |
| 45 | 38,956 | 96,77666471 | 62,2996825 | 0 |
| 50 | 44,658 | 96,45039178 | 56,92718404 | 0 |
| 55 | 48,534 | 96,1882002 | 53,31601892 | 0 |
| 60 | 54,187 | 95,72747472 | 48,12815327 | 0 |
| 65 | 58,028 | 95,3454384 | 44,67294901 | 0 |
| 70 | 63,847 | 94,61663455 | 39,59011734 | 0 |
| 75 | 67,733 | 93,98759807 | 36,3393802 | 0 |
| 80 | 73,556 | 92,71084293 | 31,80561237 | 0 |
| 85 | 77,613 | 91,44444614 | 29,02722202 | 0 |
| 90 | 83,802 | 88,3648063 | 25,94852502 | 0 |
| 95 | 88,521 | 83,98594693 | 25,65479992 | 0 |

Рисунок 8. Графическое представление полученных результатов

Количество удаленных вершин растёт линейно, это особенность атаки, так как она стремится удалить все связи у вершины, обладающей самой маленькой связностью. Атака не имеет никаких ошибок. С увеличением количества связанных вершин успешность атаки падает, это происходит из-за того, что атака оставляет после себя два графа, один большой, и другой, который имеет всего одну вершину.

* + 1. Атака на центральность

Таблица 9. Результаты атаки на центральные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The number of neighbors at a node in a ring topology | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 18,888 | 89,12801815 | 83,16549993 | 0 |
| 10 | 36,58 | 91,9052425 | 66,38106229 | 0 |
| 15 | 54,11322645 | 87,03800505 | 52,90092723 | 0,2 |
| 20 | 67,73420261 | 84,70445288 | 42,62611427 | 0,3 |
| 25 | 75,92857143 | 80,8019641 | 38,64822297 | 2 |
| 30 | 84,67468619 | 75,79867028 | 35,8177138 | 4,4 |
| 35 | 87,7693133 | 72,24244835 | 36,59329917 | 6,8 |
| 40 | 90,68191964 | 68,35711355 | 38,01245722 | 10,4 |
| 45 | 92,51666667 | 65,9159696 | 39,01674213 | 16 |
| 50 | 93,9507772 | 63,67834614 | 40,17369889 | 22,8 |
| 55 | 94,51966292 | 62,83946581 | 40,60434873 | 28,8 |
| 60 | 95,74850299 | 58,49498915 | 43,99192357 | 33,2 |
| 65 | 95,90842491 | 58,42243669 | 43,96796118 | 45,4 |
| 70 | 96,51639344 | 56,32123071 | 45,64077938 | 51,2 |
| 75 | 96,75837321 | 55,89196815 | 45,91984086 | 58,2 |
| 80 | 97,07964602 | 54,22566372 | 47,35791761 | 66,1 |
| 85 | 97,32867133 | 52,88698207 | 48,52580305 | 71,4 |
| 90 | 97,49479167 | 52,4447338 | 48,86911605 | 80,8 |
| 95 | 97,60509554 | 52,04317056 | 49,20321365 | 84,3 |

Рисунок 9. Графическое представление полученных результатов

Имеем схожую статистику, как для случайной атаки, так и для атаки на максимальную связность. Рост количества ошибок, который начинается даже раньше, чем при других атаках.

* + 1. Атака на центральность с пересчётом

Таблица 10. Результаты атаки на центральные вершины, с их перерасчётом

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The number of neighbors at a node in a ring topology | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 24,71 | 75,39998379 | 81,36866401 | 0 |
| 10 | 56,243 | 73,29215056 | 58,77829576 | 0 |
| 15 | 65,061 | 70,12298286 | 54,37728612 | 0 |
| 20 | 72,909 | 66,10156793 | 51,80600784 | 0 |
| 25 | 76,413 | 64,71754107 | 50,54738534 | 0 |
| 30 | 80,406 | 62,73059925 | 49,56083437 | 0 |
| 35 | 81,702 | 60,76704033 | 50,35211271 | 0 |
| 40 | 85,145 | 58,59268808 | 50,11125573 | 0 |
| 45 | 85,397 | 56,85712443 | 51,44572145 | 0 |
| 50 | 87,026 | 56,52423503 | 50,80921923 | 0 |
| 55 | 88,759 | 56,63814406 | 49,72854972 | 0 |
| 60 | 90,608 | 53,4554421 | 51,56509303 | 0 |
| 65 | 90,855 | 52,93920548 | 51,90208486 | 0 |
| 70 | 91,698 | 52,60626088 | 51,7611109 | 0 |
| 75 | 92,147 | 53,35137252 | 50,83831076 | 0 |
| 80 | 93,231 | 52,68426389 | 50,88193394 | 0 |
| 85 | 94,186 | 52,52006959 | 50,53344725 | 0 |
| 90 | 95,503 | 51,38349546 | 50,92722033 | 0 |
| 95 | 96,229 | 52,12472222 | 49,84090105 | 0 |

Рисунок 10. Графическое представление полученных результатов

Очень близкие графики успешности и интактности, 0 ошибок, это, несомненно, самая лучшая атака среди приведенных. Однако для получения таких результатов приходится жертвовать количество удаленных вершин, мы имеем очень резкий подъем.

* 1. Случайный граф
     1. Случайная атака

Таблица 11. Результаты случайной атаки

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The average number of nodes at the vertices | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 8,359 | 97,13573135 | 91,88042422 | 0 |
| 10 | 32,875 | 96,48855721 | 68,27938682 | 0 |
| 15 | 51,332 | 94,80800646 | 51,33315412 | 0 |
| 20 | 65,341 | 91,72011414 | 40,06916022 | 0 |
| 25 | 74,092 | 88,39366166 | 34,50736821 | 0 |
| 30 | 79,85742972 | 85,21516989 | 31,94935559 | 0,4 |
| 35 | 83,68260427 | 81,43512395 | 31,85296749 | 1,7 |
| 40 | 86,49381443 | 79,34182179 | 31,3742319 | 3 |
| 45 | 88,12681913 | 76,40950871 | 32,66273047 | 3,8 |
| 50 | 89,28864865 | 75,20891132 | 32,84697942 | 7,5 |
| 55 | 90,93952968 | 71,84726115 | 34,66243862 | 10,7 |
| 60 | 91,74167623 | 70,11193996 | 35,67813104 | 12,9 |
| 65 | 92,66706302 | 68,35062377 | 36,6614844 | 15,9 |
| 70 | 93,15679012 | 66,54381498 | 38,00991794 | 19 |
| 75 | 93,72845953 | 65,32906606 | 38,76807276 | 23,4 |
| 80 | 94,1 | 64,80359805 | 39,01981423 | 29 |
| 85 | 94,51457726 | 63,42457186 | 40,05453402 | 31,4 |
| 90 | 94,70212766 | 62,53100995 | 40,78180313 | 34,2 |
| 95 | 94,93583725 | 62,19414057 | 40,95547193 | 36,1 |

Рисунок 11. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на максимально-связные вершины

Таблица 12. Результаты атаки на максимально-связные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The average number of nodes at the vertices | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 4,236 | 97,10019727 | 95,88683564 | 0 |
| 10 | 17,941 | 97,18111246 | 82,56473661 | 0 |
| 15 | 29,653 | 96,79800531 | 71,29648749 | 0 |
| 20 | 38,678 | 96,20498635 | 62,78983538 | 0 |
| 25 | 45,661 | 95,5037398 | 56,39203737 | 0 |
| 30 | 50,119 | 95,22726607 | 52,27304652 | 0 |
| 35 | 54,633 | 94,57882924 | 48,32874822 | 0 |
| 40 | 58,899 | 94,19162996 | 44,52207187 | 0 |
| 45 | 61,486 | 93,7647203 | 42,34782407 | 0 |
| 50 | 63,982 | 93,32394627 | 40,2894727 | 0 |
| 55 | 66,289 | 92,84799673 | 38,45199145 | 0 |
| 60 | 68,647 | 91,75750675 | 37,01122434 | 0 |
| 65 | 70,89289289 | 91,19156636 | 35,35166053 | 0,1 |
| 70 | 72,243 | 90,68148526 | 34,4889746 | 0 |
| 75 | 73,63126253 | 90,54071915 | 33,33372539 | 0,2 |
| 80 | 75,37059416 | 89,43971198 | 32,58875767 | 0,7 |
| 85 | 76,6 | 89,0935434 | 31,75434576 | 1 |
| 90 | 77,72346939 | 88,5351641 | 31,18739883 | 2 |
| 95 | 79,03684749 | 87,91191426 | 30,5171944 | 2,3 |

Рисунок 12. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на минимально-связную вершину

Таблица 13. Результаты атаки на минимальную вершину

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The average number of nodes at the vertices | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 1 | 97,56184063 | 99,02438159 | 0 |
| 10 | 1,46 | 97,98104551 | 98,56947674 | 0 |
| 15 | 2,6 | 97,9675383 | 97,452844 | 0 |
| 20 | 3,942 | 97,93933397 | 96,13923146 | 0 |
| 25 | 5,371 | 97,90841174 | 94,74133921 | 0 |
| 30 | 6,944 | 97,87328738 | 93,20367892 | 0 |
| 35 | 8,526 | 97,83682635 | 91,65843219 | 0 |
| 40 | 10,276 | 97,79485046 | 89,95060117 | 0 |
| 45 | 11,846 | 97,75588148 | 88,41983828 | 0 |
| 50 | 13,64 | 97,70956284 | 86,67241563 | 0 |
| 55 | 15,264 | 97,66590976 | 85,09227553 | 0 |
| 60 | 17,019 | 97,61690032 | 83,38657973 | 0 |
| 65 | 18,733 | 97,56693631 | 81,72278582 | 0 |
| 70 | 20,375 | 97,51721153 | 80,13086815 | 0 |
| 75 | 21,834 | 97,47132724 | 78,71811041 | 0 |
| 80 | 23,582 | 97,41329835 | 77,02799598 | 0 |
| 85 | 25,007 | 97,3649987 | 75,65193478 | 0 |
| 90 | 26,401 | 97,31499363 | 74,30786853 | 0 |
| 95 | 27,933 | 97,25853616 | 72,83277309 | 0 |

Рисунок 13. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на центральность

Таблица 14. Результаты атаки на центральные вершины

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The average number of nodes at the vertices | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 6,5 | 97,12750731 | 93,68671202 | 0 |
| 10 | 22,512 | 97,11284731 | 78,13795581 | 0 |
| 15 | 33,309 | 96,62475588 | 67,81526006 | 0 |
| 20 | 41,287 | 96,18388598 | 60,288559 | 0 |
| 25 | 47,465 | 95,46109525 | 54,68939114 | 0 |
| 30 | 51,936 | 95,01952008 | 50,65066205 | 0 |
| 35 | 55,458 | 94,68367057 | 47,49032998 | 0 |
| 40 | 58,197 | 94,28817635 | 45,12711001 | 0 |
| 45 | 61,155 | 93,49089149 | 42,82564531 | 0 |
| 50 | 63,253 | 93,09676478 | 41,11350338 | 0 |
| 55 | 65,523 | 92,81520576 | 39,18469273 | 0 |
| 60 | 66,505 | 92,58843993 | 38,42405803 | 0 |
| 65 | 68,465 | 91,82402136 | 37,13268378 | 0 |
| 70 | 69,412 | 91,58681724 | 36,42775842 | 0 |
| 75 | 71,242 | 90,48440201 | 35,53710232 | 0 |
| 80 | 72,316 | 90,26093512 | 34,72690216 | 0 |
| 85 | 73,313 | 89,52719121 | 34,36493031 | 0 |
| 90 | 73,748 | 89,84585175 | 33,74048125 | 0 |
| 95 | 74,906 | 88,96733862 | 33,35812533 | 0 |

Рисунок 14. Графическое представление полученных результатов

* + 1. Атака на центральность с пересчётом

Таблица 15. Результаты атаки на центральные вершины, с их перерасчётом

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| The average number of nodes at the vertices | Deleted nodes, % | Intactness, % | Success, % | Errors, % |
| 5 | 4,236 | 97,10019727 | 95,88683564 | 0 |
| 10 | 17,941 | 97,18111246 | 82,56473661 | 0 |
| 15 | 29,653 | 96,79800531 | 71,29648749 | 0 |
| 20 | 38,678 | 96,20498635 | 62,78983538 | 0 |
| 25 | 45,661 | 95,5037398 | 56,39203737 | 0 |
| 30 | 50,119 | 95,22726607 | 52,27304652 | 0 |
| 35 | 54,633 | 94,57882924 | 48,32874822 | 0 |
| 40 | 58,899 | 94,19162996 | 44,52207187 | 0 |
| 45 | 61,486 | 93,7647203 | 42,34782407 | 0 |
| 50 | 63,982 | 93,32394627 | 40,2894727 | 0 |
| 55 | 66,289 | 92,84799673 | 38,45199145 | 0 |
| 60 | 68,647 | 91,75750675 | 37,01122434 | 0 |
| 65 | 70,89289289 | 91,19156636 | 35,35166053 | 0,1 |
| 70 | 72,243 | 90,68148526 | 34,4889746 | 0 |
| 75 | 73,63126253 | 90,54071915 | 33,33372539 | 0,2 |
| 80 | 75,37059416 | 89,43971198 | 32,58875767 | 0,7 |
| 85 | 76,6 | 89,0935434 | 31,75434576 | 1 |
| 90 | 77,72346939 | 88,5351641 | 31,18739883 | 2 |
| 95 | 79,03684749 | 87,91191426 | 30,5171944 | 2,3 |

Рисунок 15. Графическое представление полученных результатов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ