

ОЦЕНИВАНИЕ ВАЖНОСТИ АБОНЕНТОВ РАДИОСЕТИ КЛАССА MANET НА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ СЕТИ

И.В. Лаптев, А.М. Авилкин, П.А. Шишлов (Череповец)

Радиосети класса Mobile Ad hoc Network (MANet) обладают рядом значимых достоинств: высокая живучесть, простота и оперативность развертывания, унификация абонентского оборудования, возможность объединения в сеть 700 и более абонентов. Принцип многошаговых adhoc сетей заложен в алгоритмы функционирования технической основы систем связи тактического уровня ведущих иностранных государств (в том числе США). Задача идентификации функциональных ролей абонентов в иерархии системы управления войсками и оружием, решаемая в ходе радиомониторинга таких сетей, является нетривиальной ввиду высокой структурной избыточности элементов системы и их взаимосвязей. Выделение информативных признаков, позволяющих принять решение по управлению войсками и оружием, в описанной ситуации является весьма актуальной задачей.

Важность объектов поражения является специфическим свойством в том смысле, что отражает отношение к объекту противной (оперирующей) стороны. Обычно с этим свойством связывают какой-либо вид опасности объекта, например, способность объекта наносить мощные огневые удары (средства ракетно-ядерного нападения), способность оказывать решающее влияние на организацию боевых действий (пункты управления, узлы связи) или на экономику и экологию района боевых действий (энергетические центры). Подобные свойства принято оценивать ранговыми или номинальными показателями с переходом к количественной оценке, представляющей собою вероятность нанесения огневого удара по объекту [1].

Важность абонентов самоорганизующейся пакетной радиосети класса MANet возможно оценить путем отслеживания изменений инвариантов сети (вычисляемых для каждого абонента). Результаты исследований сложных сетей, например, [2], позволяют предположить наличие контрастных абонентов (хабов). Данные абоненты зачастую оказывают существенное влияние на целостное функционирование сети и обладают контрастными сетевыми параметрами: высокая степень узлов сети, девиантный уровень посредничества, влияние на среднюю длину кратчайшего маршрута в сети и др.

Разработка контрастных признаков абонентов на основе аппарата анализа сложных сетей SNA (Social Network Analysis) требует адаптации известных моделей [3, 4] к условиям, когда доступ к данным, передаваемым в сети выше физического уровня (на канальном и сетевом уровне) отсутствует. Применение традиционного потокового подхода к исследованию распределения ресурса сети (пропускной способности) на модели многопродуктовой сети невозможно. Многопродуктовая сеть $S = (V, R, P)$ задается двумя графами (логическим и физическим) на множестве $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – абонентов самоорганизующейся сети, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_e\} \subset V \times V$ – множестве ребер физического графа G и $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} \subset V \times V$ – множестве тяготеющих пар или ребер логического графа \bar{G} .

Идентификация структуры физического графа затруднена, а построение логического графа невозможно ввиду отсутствия доступа к данным, передаваемым на канальном и сетевом уровнях.

В интересах экспериментального исследования возможности оценивания важности абонентов сети с использованием инструментов теории анализа сложных сетей разработана имитационная модель [5]. Перемещение абонентов реализовано по следующим законам (рисунок 1):

- 1) закон Гаусса-Маркова – имитирует перемещение по дорогам и пригодной для перемещения местности;
- 2) случайный закон – движение абонента с переменной скоростью и направлением;
- 3) циклический закон – логистические перемещения, имитация плеча подвоза материального обеспечения;
- 4) закон перемещения подкат (перекат) – имитирует движение объекта с периодическими стоянками на месте.

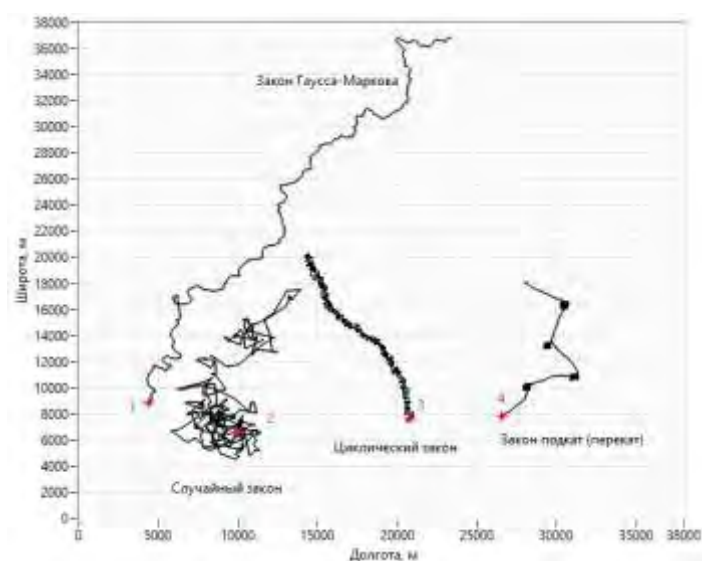


Рис.1 – Модели перемещения абонентов сети

Варьирование траекторными параметрами в аналитических моделях перечисленных законов перемещения позволяет имитировать элементы боевого порядка с соответствующими функциональными ролями. Иные законы перемещения, свойственные элементам боевого порядка (модель преследования, развертывание из колонны, стягивание в район сосредоточения и др.), рассматриваются как направления дальнейшего исследования. Требуемая статистическая значимость результатов имитационного моделирования ($\alpha = 0.05$) достигается увеличением количества абонентов радиосети (до 800) и количеством опытов, обеспечивающих формирование репрезентативной выборки.

Абоненты сети MANet размещаются на местности в необходимом количестве, имитируя боевой порядок подразделения. Структура первичной сети формируемой абонентами (физический граф) описывается графовой моделью и прогнозируется путем расчёта электромагнитной доступности (ЭМД) между каждой парой абонентов с учетом профиля радиотрассы (используется карта высот участка местности, например SRTM). Программа, реализующая имитацию перемещения абонентов сети и расчет ЭМД между каждой парой абонентов в каждый момент времени, разработана в среде LabView 2014 (рисунок 1). При построении имитационной модели использована известная методика, предложенная Р. Шенноном, с соответствующими статистическими инструментами исследования.

Методика расчета ЭМД выбирается из ряда известных с учетом тактико-технических характеристик абонентского оборудования. В описываемой модели реализован расчет ЭМД на радиотрассах с высокоподнятыми антеннами над неровной земной поверхностью (рисунок 2).

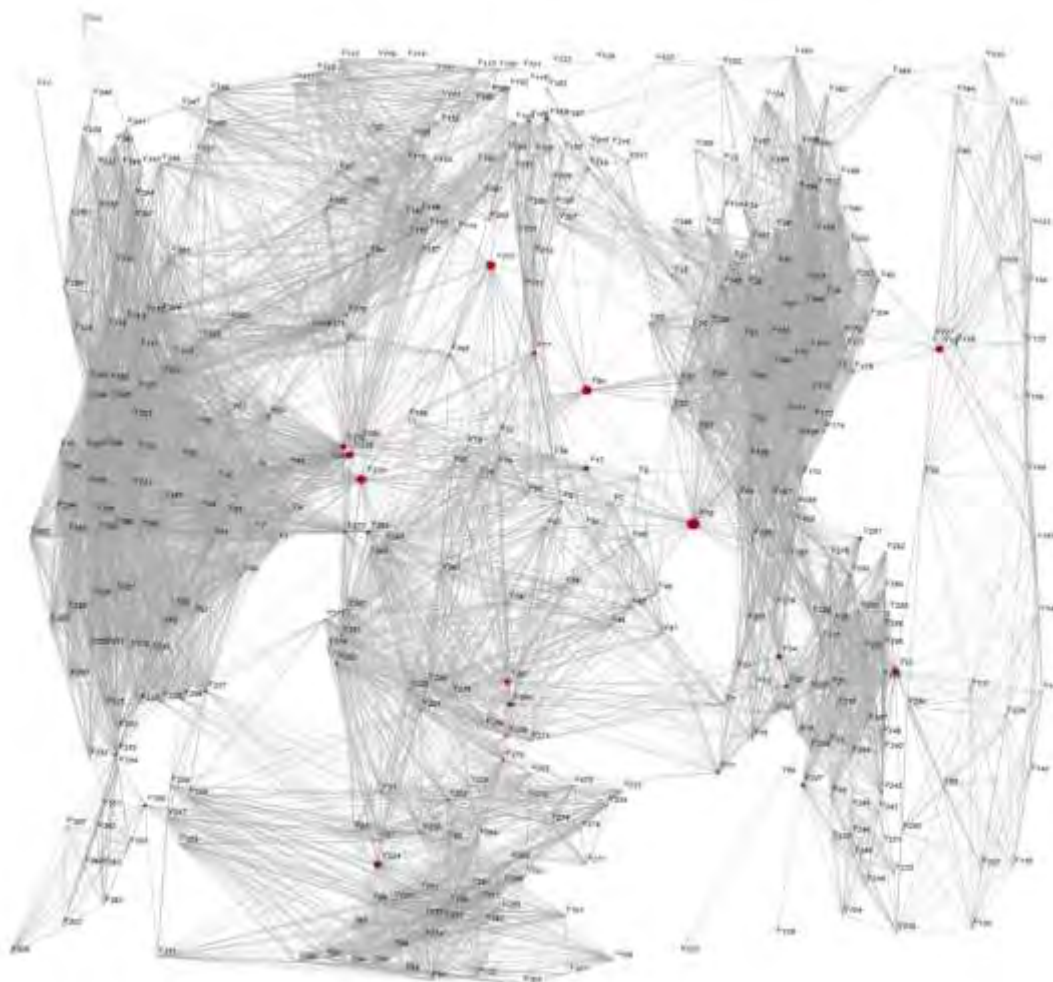


Рис.2 – Вариант графовой модели первичной сети MANet из 400 абонентов

Движение абонентов на местности приводит к изменению структуры первичной сети и динамичности их топологических характеристик (рассчитываемых для каждого абонента инвариантов графа). В качестве гипотезы эксперимента принято предположение о том, что на основе анализа изменения топологических характеристик абонента в сети возможно сделать вывод о его важности (уровне в иерархии системы управления войсками или функциональной роли в системе связи). Для анализа закономерностей выбраны следующие инварианты (расчет инвариантов сети выполнен в среде компьютерной математики Wolfram Mathematica 11.0.1.0):

- центральность по степени (Degree Centrality);
- центральность по близости (Closeness Centrality);
- центральность по посредничеству (Betweenness Centrality);
- центральность Page Rank (Page Rank Centrality);
- индексы радиальности (Radiality Centrality).

При перемещении абонента использована следующая методика обработки результатов измерения топологических характеристик:

1. на каждой итерации перемещения абонента вычисляется и суммируется с предыдущим мгновенное значение каждого инварианта, отдельно накапливаются модули приращений инвариантов, позволяющие судить о скорости изменения топологических характеристик абонента;

2. суммарные значения характеристик абонентов нормируются, а суммарные значения скоростей инвертируются и также подвергаются нормировке, при этом каждому абоненту ставится в соответствие два весовых коэффициента Ka_i и Kv_i , где $i = 1..N$, N – количество абонентов, участвующих в формировании сети;

3. полученное в результате перемножения весовых коэффициентов значение $K_{Pi} = Ka_i \times Kv_i$ выступает в качестве ранжирующего фактора при построении упорядоченного списка абонентов $V_1 \succ V_2 \succ \dots \succ V_N$.

На примере центральности по степени (Degree Centrality) интерпретируем практический смысл величины ранжирующего фактора K_{Pi} . Узлы сети (соответствующие абонентам), находящиеся в начале списка ранжирования, имеют максимальное количество инцидентных ребер, то есть потенциально могут организовать радиоканалы с наибольшим количеством абонентов. Умножение на коэффициент Kv_i позволяет отфильтровать узлы, которые при перемещении случайно получают большие степени (скорость изменения инварианта в этом случае высока, а Kv_i минимален).

Таким образом, из множества абонентов выделяются те, которые в течение всего времени функционирования сети способны организовать радиоканал с максимальным числом соседей. Поскольку связность сети (уровень структурной избыточности) в сетях класса MANet влияет на пропускную способность [4], то полученный ранжированный список абонентов может быть использован при планировании применения деструктивных воздействий на радиосеть в интересах информационного противоборства [5].

На рисунке 3 приведены результаты моделирования деструктивных воздействий на радиосеть из 400 абонентов. Для оценки ущерба наносимого сети деструктивным воздействием w применен показатель $\psi(w) = v_{\max}/v(w)$, где v_{\max} – средняя скорость передачи данных в сети до воздействия, $v(w)$ – средняя скорость передачи данных в сети после деструктивного воздействия w . Деструктивное воздействие – выведение из строя одного абонента, что на модели соответствует удалению вершины графа с инцидентными ей ребрами.

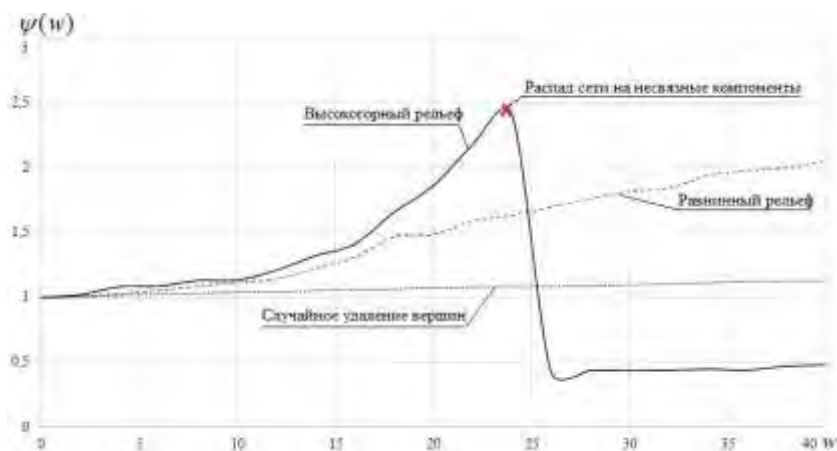


Рис.3 – Снижение средней скорости передачи данных между абонентами СПР

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что радиосеть MANet, развернутая на местности с большими перепадами высот, более

подвержена деструктивным воздействиям ввиду меньшей структурной избыточности её физического графа. В то же время, аналогичный объем деструктивных воздействий, спланированных без учета результата ранжирования абонентов по важности, оказывает минимальное влияние на связность сети и среднюю скорость передачи данных.

Результаты моделирования подтверждают целесообразность применения предложенного подхода к оцениванию важности абонентов радиосети класса MANet в интересах повышения результативности принятия решений по управлению войсками и оружием. Одним из основных направлений дальнейшего исследования являются вопросы адекватности графовых моделей, формируемых предложенным способом, подтверждение статистической значимости результатов на натурной модели, а также интерпретация результатов ранжирования абонентов с использованием обозначенных инвариантов графа.

Литература

1. **Запорожец В.И.** Боевая эффективность средств поражения и боеприпасов: тексты лекций. – Санкт-Петербург: Балтийский гос. техн. университет, 2006. – 159 с.
2. **Milgram S.** The small world problem / *Psychology Today*, 1967. – № 2. – P. 60-67.
3. **Куликов С.В., Чеботарь И.В., Балдычев М.Т.** [и др.] Моделирование системы мониторинга воздушно-космического пространства. – М.: Радиотехника, 2020. – т.84. – № 4(8). – С. 46-58.
4. **Величко В.В.** Модели и методы повышения живучести современных систем связи / В.В. Величко, Г.В. Попков, В.К. Попков. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2014. – 270 с.
5. **Бурцев Н.Н., Лаптев И.В., Залесов О.В., Попов Е.Р.** Имитационная модель перемещения абонентов самоорганизующейся пакетной радиосети класса Mobile Ad hoc Network / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2020612032 от 14.02.2020 г.
6. **Владимиров В.И., Стучинский В.И.** Выбор показателей информационного противоборства в операциях в условиях двухсторонней радиоэлектронной борьбы // *Военная мысль*. – 2016. – №10. – С. 33-39.