

ПРОЕКТ СИСТЕМЫ РАННЕГО РЕАГИРОВАНИЯ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Демин С.С.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65,
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Россия, г. Москва, ул. Мясницкая д.20
sdemin@hse.ru*

Аннотация: В данной работе предлагается двухэтапная модель для поиска оптимального расположения сенсоров на поверхности моря для оперативного реагирования на возникающую угрозу катастрофы. Для этих целей комбинируются методы сетевого анализа и линейного программирования.

Ключевые слова: система раннего реагирования, разливы нефти, сетевой анализ, оптимизация.

Введение

В последнее время в связи с глобальным потеплением активно развивается добыча нефти и газа в Арктическом регионе. Как следствие, увеличивается количество кораблей, в том числе нефтяных танкеров, которое перемещается в Северном Ледовитом океане. Помимо этого, прокладываются трубопроводы для транспортировки нефти от добывающих вышек к потребителям (согласно [1], количество аварий на промышленных трубопроводах составляет 50-60 тыс. случаев в год). Всё это увеличивает вероятность возникновения разливов нефти.

В данной ситуации критически важным фактором становится скорость реагирования на возникшую катастрофу. Ведь при разливе, особенно при сильных морских течениях и ветрах, нефтяное пятно распространяется очень быстро, причём как на поверхности моря, так и вглубь. Кроме того, при задержках в устранении разлива может серьёзно пострадать окружающая среда.

В связи с этим, одной из первостепенных задач является оптимальное расположение сенсоров, которые будут передавать сигнал о наличии нефти на поверхности моря в единый центр управления. В идеальной ситуации, безусловно, надо поставить датчики на каждом квадратном метре. Однако, всё это требует денежных затрат, а бюджет на превентивные меры против чрезвычайных ситуаций ограничен. Поэтому возникает ситуация, при которой надо максимизировать площадь, покрываемую сенсорами, при этом минимизируя экономические издержки на установку и поддержку работы датчиков.

1 Модель

1.1 Структура модели

Как уже упоминалось, основная задача состоит в максимальном покрытии исследуемого объекта (в нашем случае поверхности моря) при минимальных затратах на установку и обеспечение работы сенсоров. В данной работе предлагается модифицировать данную задачу, используя тот факт, что некоторые факторы, такие как морские течения и ветра, позволяют достаточно точно узнавать

значение тех или иных параметров при небольшом смещении в координатах в том же направлении, что и вышеупомянутые факторы.

В результате, можно утверждать, что существуют некоторые участки моря, значения параметров в которых позволят с большой точностью вычислить значение этих же параметров в других участках, даже находящихся за пределами действия сенсора. Будем называть такие участки критическими точками.

Учитывая это, основная задача оптимизации модифицируется – теперь надо максимизировать не покрытую сенсорами площадь, а количество закрытых критических точек. После этого, как и во многих других работах по оптимизации расположения сенсоров [2,3], строится задача линейного программирования. Однако, поскольку на предварительном этапе обработки уже выделены критические точки, покрытие которых значительно важнее, в предложенной модели решение задачи линейного программирования становится задачей целочисленного программирования, поскольку необходимо лишь выбрать среди всего множества критических точек некоторое подмножество, которое покрывает максимальную площадь, при этом не нарушив никаких ограничений (в первую очередь, экономических).

1.2 Поиск критических точек

Для реализации первого этапа предложенной модели весь исследуемый участок моря разбивается на элементарные территории небольшой площади. Из этих элементарных территорий путём соединения граничащих друг с другом участков формируется сеть.

Затем на основе данной сети строится целая группа однородных сетей, в каждой из которых веса на рёбрах выставляются на основе одного из заранее выбранных факторов, которые активно влияют на перемещение между элементарными территориями. Так, например, строится отдельная сеть перемещения за счёт морских течений. Для этого, используя усреднённую по времени карту морских течений, для каждой пары элементарных территорий i и j вес ребра, идущего из i в j , устанавливается равным проекции вектора средней скорости течения на данное направление. Затем аналогичным образом строится сеть и для всех остальных выделенных факторов.

После этого, для анализа всех построенных сетей используются основные методы сетевого анализа, позволяющие оценить влияние отдельных вершин в сети. В первую очередь, речь идёт о таких классических индексах центральности, как *eigenvector* [4] и *PageRank* [5].

Eigenvector центральность назначает относительные оценки важности всем узлам в сети. В основе этого подхода лежит идея, согласно которой соединения с узлами с высокой оценкой важности вносят больший вклад в оценку рассматриваемого узла, чем аналогичные соединения с узлами с низкой оценкой важности.

Для практического подсчёта данного индекса центральности составляется матрица смежности сети A . Затем, решив линейную систему $Av=v$, значение *eigenvector* центральности для i -ой вершины в сети будет равно i -ой координате вектора v .

В свою очередь для вычисления индекса центральности *PageRank* производится симуляция случайного марковского процесса – блуждания по сети, при котором вероятность перехода из состояния i в состояние j равна весу ребра, исходящего из i в j , нормированная на сумму весов всех исходящих из вершины i рёбер. Кроме того, в этом блуждании заложена некоторая вероятность окончания блуждания с последующим повторным запуском из случайной вершины сети. В результате данного моделирования вычисляется среднее время нахождения в каждой вершине, которое и даёт значение индекса центральности *PageRank*.

Когда все индексы на всех сетях посчитаны, остаётся выделить критические точки. Для начала надо выделить наиболее важные вершины сети. В данной работе решено использовать фиксированное количество лучших вершин с точки зрения каждого индекса для каждой сети (лучшие 10 вершин), хотя также можно было бы использовать все вершины, индекс центральности которых превышает заданный заранее порог (например, все вершины со значением индекса центральности выше 0.5).

После выделения нескольких наборов вершин, признанных важными с точки зрения одного из индексов центральности на одной из рассматриваемых сетей, остаётся лишь агрегировать эти наборы. Для этого также есть много разных подходов, однако было выбрано самое простое решение – просто объединить все эти множества. Таким образом становятся все вершины, попавшие хотя бы один раз в список 10 лучших согласно какому-нибудь индексу центральности на какой-нибудь из рассматриваемых сетей.

1.3 Оптимизация покрытия критических точек

На этапе оптимизации покрытия критических точек, как уже упоминалось при описании общей структуры модели, решается задача выбора некоторого подмножества всех критических вершин, которое удовлетворяет всем наложенным на модель ограничениям (в данной работе рассматривается только бюджетное ограничение, однако в дальнейшем модель можно усложнять, добавляя другие ограничения). В результате решается следующая задача:

$$(1) \quad \begin{cases} \Sigma \\ \Sigma \end{cases}$$

где N – общее количество критических точек, x_i – бинарная переменная, показывающая надо ли ставить в i -й критической точке сенсор, c_i – суммарная стоимость обслуживания сенсора в i -й критической точке (установка и поддержание стабильной бесперебойной работы), а S – бюджет, выделенный на решение данной задачи.

Заключение

В результате была получена универсальная модель, которая может применяться к территории любого масштаба (участку моря, целому морю, всему Северному Ледовитому океану). Данная модель анализирует рисунок морских течений, ветров и прочих факторов, влияющих на распространение веществ на поверхности моря. Как следствие, упрощается задача по оптимальному расположению сенсоров благодаря меньшему перебору возможных локаций для них.

При этом данная модель является достаточно простой в применении и при необходимости может подстраиваться и усложняться за счёт добавления дополнительных ограничений на этапе оптимизационной задачи или же при изменении правил выбора критических точек.

Литература

1. Куликова И.С. Особенности локализации разливов нефти из подводных переходов трубопроводов в условиях открытой воды // Территория нефтегаз. 2012, №5. – С.48-53.
2. Salari M., Kattan L., Lam W.H.K., Lo H.P., Esfeh M.A. Optimization of traffic sensor location for complete link flow observability in traffic network considering sensor failure // Transportation Research Part B. Vol. 121. 2019. – P. 216–251.
3. Gentile C. Distributed Sensor Location through Linear Programming with Triangle Inequality Constraints // IEEE Transactions on Wireless Communications. Vol. 6(7). 2007. – P. 4020-4027.
4. Leontief W.W. The Structure of American Economy // Harvard University Press. 1941. – P. 1919-1929.
5. Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web. 1998.