Кремер А.И., Алгазинов Э.К.

Аналитическое моделирование маршрутизации в телекоммуникационных системах

Процесс доставки пакета получателю по одиночному маршруту в сети представляет собой конечную цепь Маркова. Матрица переходных вероятностей *P* совместно с априорным распределением узлов определяет Марковский процесс, описывающий процедуру доставки пакета конкретному узлу-адресату. Для конкретной сети можно построить матрицу переходных вероятностей *P*, которая описывает дискретный процесс Маркова с двумя поглощающими состояниями, одно из которых - искомый узел *l*, а другое - потеря поиска. Остальные узлы образуют множество невозвратных состояний, вероятности переходов в котором представлены матрицей *S*. Для замкнутого задания потоков в сети вводится нулевое состояние конечной цепи Маркова, из которого нагрузка поступает в узлы сети. Исходными данными при задании начального распределения потоков является матрица интенсивностей $l^{`} = \| l^{`}_{ij} \|_{n,n}$, где $l^{`}_{ij}$ - интенсивность потока заявок (пакетов/с), исходящих из узла *i* в направлении узла *j*. Вероятности переходов в узлы сети из нулевого состояния определяются на основании матрицы интенсивностей

$$P_{0i}^{l} = \frac{l^{`}_{il}}{\sum_{j=1}^{n} l^{`}_{il}}. \qquad (1)$$

При этом сама матрица *P* имеет следующий вид:

$$P^{(l)} = \left[\frac{E}{S} \frac{O}{Q} \right]_{n+2,n+2}, \qquad (2)$$

где *E* - единичная матрица, размерности *2x2*,

O - нулевая матрица, размерности *2xn*,

S – матрица, размерности *nx2*, отображает переходы из невозвратных состояний в эргодические (поглощающие),

Q - матрица, размерности *nxn*, отражает поведение процесса до выхода их множества невозвратных состояний,

l -индекс, означающий, что матрица построена для *l*-го искомого узла.

При анализе функционирования всей сети в целом, когда возникновение требований на передачу пакетов носит массовый характер, необходимо рассмотрение совокупности конечный цепей Маркова, где каждому узлу- адресату соответствует одна вложенная конечная цепь Маркова. Состояния цепи отождествляются с узлами сети, и все процессы, как правило, определены на одних и тех же состояниях. Полное описание процессов маршрутизации в сети с *n* узлами предполагает наличие *n* переходных матриц вида *(2)*. При этом система уравнений *(3)*, описывающая массовые процессы маршрутизации в сети, является нелинейной.

$$p_{jk} = (l_{jk} - C_{jk}) \cdot m \big/ l_{jk} \text{ для } r_{jk} \geq 1,$$

$$p_{jk} = (1 - r_{jk})\, r_{jk}^{m_{jk}} \big/ (1 - r_{jk}^{m_{jk}+1}) \text{ для } r_{jk} < 1, \qquad (3)$$

$$P^{(l)} = \| p_{ik}^{(l)} \|_{n-1,n-1} \quad p_{ik}^{(l)} = \sum_{s=1}^{2^r} \Omega_i^{(s)} x_{ik}.$$

где *1/m* - средняя длина пакетов,

l_{ij} - интенсивность потока в ребре ***jk***,

C_{jk} - пропускная способность ребра ***jk***,

$W_i^{(s)}$- вероятность возникновения ситуации (X_{iW}),

p_{ik} - вероятность блокировки канала ***ik***,

ρ_{jk} - коэффициент использования канала,

$P_{ik}^{(l)}$ - вероятность отправки пакета из узла ***i*** в узел ***k*** для искомого узла ***l***.

Численное решение системы нелинейных уравнений *(3)* для заданной сети, трафика и условий функционирования позволяет осуществить определение вероятностно-временных характеристик сети, провести оценку используемых алгоритмов маршрутизации, способов управления потоками и т.п. Как видно из *(4)*, поиск решения системы численным методом носит итерационный характер.

$$p^{(b)}{}_{jk} = (l^{(b-1)}{}_{jk} - C_{jk}) \cdot m \big/ l^{(b-1)}{}_{jk} \text{ для } r^{(b-1)}{}_{jk} \geq 1,$$

$$p^{(b)}{}_{jk} = (1 - r_{jk})\, r_{jk}^{m_{jk}} \big/ (1 - r_{jk}^{m_{jk}+1}) \text{ для } r^{(b-1)}{}_{jk} < 1,$$

$$P_l^{(b)} = \| p_{ik}^{(b)} \|_{n-1,n-1}, \; p_{ik}^{(b)} = \sum_{s=1}^{2^r} \Omega_i^{(s)(b)} x^{(b)}{}_{ik}, \qquad (4)$$

$$l^{(b)}{}_{jk} = \Big(\sum_{l}^{n} \sum_{i \neq l}^{n} l_{il}^{(b)} \cdot f_{ij}^{(b)} \cdot q_{jk}^{(b)}\Big) / (1 - s_{jk}^{(b)}) + l_s^{(b)}.$$

где ***b*** – номер шага,

$f^{(b)}{}_{ij}$ - соответствующая строка фундаментальной матрицы ***F*** на шаге ***b***,

$q^{(b)}{}_{jk}$ - соответствующая строка фундаментальной матрицы ***Q*** на шаге ***b***,

$s^{(b)}{}_{jk}$ - среднеквадратичное отклонение интенсивности потока на шаге ***b***,

$\lambda^{(b)}{}_s$ - служебный поток на шаге ***b***.

Идентификация параметров модели процесса маршрутизации, близких к оптимальным значениям, возможна в ходе итерационного процесса поиска решения системы нелинейных уравнений *(4)*. После введения в итерационный процесс поиска решения системы потоковых уравнений пошаговой процедуры коррекции конфигурационных параметров алгоритма маршрутизации становится возможным нахождение их оптимальных значений для заданной сети и трафика.