

Метод определения температуры в произвольной точке здания в условиях неполного охвата сенсорными сетями

К.С. Юричев, Магистрант кафедры САПР и ПК ВолгГТУ, Волгоград

Д.П. Панченко, Старший преподаватель кафедры САПР и ПК ВолгГТУ, Волгоград

М.В. Щербаков, Доцент кафедры САПР и ПК ВолгГТУ, Волгоград

Введение

В последние несколько лет возрос интерес к разработке и изучению беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей (БСС) - сетей, состоящих из множества простых миниатюрных устройств (узлов), каждое из которых содержит микроконтроллер, приемопередатчик и автономный источник питания. Узлы оснащаются сенсорами, способными регистрировать информацию о параметрах физических полей различной природы в местах их расположения. Результаты измерений передаются по многозвенной цепочке (от узла к узлу) в вычислительный центр для обработки и анализа.

В настоящее время БСС находят все более широкое применение в качестве распределенных систем мониторинга различных объектов и физических процессов. Специфика данной задачи определяет общую структуру беспроводных сенсорных сетей, которые, как правило, представляют собой распределенные на большой территории информационно-измерительные комплексы.

В типичной беспроводной сенсорной сети данные, собираемые всеми узлами, хранятся на единственном сервере, выступающем в качестве шлюза с сетью IP. Чтобы достичь шлюза, данные перемещаются по сети от узла к узлу, при этом существует вероятность потери некоторого количества данных, возрастающая с увеличением размера сети. Кроме того, когда узел передает данные соседнему узлу, а тот передает их дальше, расходуется энергия. Сети большого объема с множеством узлов расходуют для передачи данных значительно больше электроэнергии[7].

Отсюда имеем важное ограничение при построении моделей идентификации систем, связанное с ограниченным отражением реальной системы на модель:

- по мере роста сенсорной сети ее производительность снижается
- размерность сети прямо пропорциональна энергопотреблению.

На примере решаемой задачи предлагается метод уменьшения недетерминированности сенсорной системы, используя ее стохастические свойства, с целью максимального отображения реальной системы.

Далее будут рассмотрены методы оптимального проектирования БССи построения на её основе оптимально детерминированной модели, решающей задачу определения значений температур.

Постановка задачи

Первичная постановка задачи. Пусть в трехмерном евклидовом пространстве существует некоторое замкнутое множество гиперплоскостей $H = \{H_j = \{(x_i, y_i, z_i) | i \in [1, M]\} | j \in [1, N]\}$, образующих ограниченную с N сторон область $O(H) = H_1 \times H_2 \times \dots \times H_N$. Есть замкнутое множество значений некоторой характеристической величины $Q(x, y, z)$, определяющее состояние системы в заданной точечной области определения (x, y, z) , непрерывно, нелинейно и, вообще говоря, с некоторой вероятностной мерой распределенное по области $O(H)$. Существует множество сенсорных точек $S = \{s_i = (x_i, y_i, z_i) | i = \overline{1, m}\}$, где для каждой точки s_i в момент времени t определено значение характеристической величины $Q_{s_i}(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ и с переменной вероятностной мерой, подчиняющейся некоторому закону распределения, определена величина Q_p в пределах некоторой окрестности $\overline{s_i dx} \times \overline{s_i dy} \times \overline{s_i dz}$ с центром масс в точке s_i .

- 1) Требуется идентифицировать оптимальную структуру сенсорной сети, покрывающей область $O(H)$, минимизировав кол-во узлов m .
- 2) Требуется определить значение характеристической величины в произвольной точке рассматриваемого пространства.

Конкретизированная постановка задачи. Определив характеристическую величину как температуру системы, параметризованную координатами в рассматриваемом пространстве, а область $O(H)$ как анализируемое здание, исходя из условий первичной постановки задачи, необходимо определить значение температуры в произвольной точке здания $U(x, y, z) \in O(G)$.

Нечеткая модель как базис для решения задачи определения температур на доверительных интервалах в произвольных точках ограниченного пространства

По определению сенсорная система является детерминированной связанной (сильно или слабо) системой, имеющая контрольные точки, выступающие в роли индикаторов состояния системы.

Тогда можно описать такую систему как вершинный (элементы системы-вершины) граф:

$$G = \langle X, S, U \rangle \quad (1)$$

где

$$X = \left\{ \langle (x, y), Q \rangle \mid \begin{cases} x \in O_x(H) \\ y \in O_y(H) \end{cases} \right\} \quad (2)$$

- это некоторые неопределенные состояния системы (Q - неизвестно), на заданных параметрах $\langle x, y \rangle$ – координатах области рассмотрения (координата z опущена для упрощения вида расчетов); Q – измеряемая величина, характеризующая состояние системы, в данной задаче - температура.

$$S = \left\{ s_i = \langle (x_i, y_i), Q \rangle \mid i = \overline{1, m}, \begin{cases} x \in O_x(H) \\ y \in O_y(H), s_i \notin X \end{cases} \right\} \quad (3)$$

- это замкнутое множество детерминированных состояний системы на заданных параметрах $\langle x_i, y_i \rangle$, что сводится к множеству состояний известных узлов сенсорной сети.

$$U = \{ \langle s_i, s_j \rangle, \dots, \langle s_i, s_m \rangle, \dots, \langle s_m, s_m \rangle \} \quad (4)$$

- это замкнутое множество связей между локализованными в некоторой точке пространства детерминированными состояниями системы, то есть узлами сенсорной системы. Характер этой связи определяется функцией меры близости узлов сенсорной сети, в соответствии с выбранной метрикой пространства.

$$\psi(s_{i,k}^x, s_{j,k}^x) = \|s_{i,k}^x - s_{j,k}^x\| \quad (5)$$

где k – число измерения в пространстве, x – множество координат, определяющих положение точки $s_{i,k}^x$ в выбранном пространстве, $\|*\|$ - метрика.

Тогда, если система в действительности является детерминированной, то с некоторой мерой адекватности может быть построена нечеткая модель системы. В данном контексте, нечеткая модель, в отличие от стохастической модели, описывает систему как нечеткий граф состояний с нечеткими правилами связей вершин:

$$\tilde{G} = \langle X', \Delta, S, \tilde{U}_{x,s} \rangle \quad (6)$$

где X' - конечное непрерывное множество всех возможных, вообще говоря, определенных с некоторой вероятностной мерой, состояний системы при вариации параметров x_i, y_i внутри их области определения;

Δ – допустимая погрешность или доверительный интервал, такой что в окрестности $X'_i - \Delta \leq X'_i \leq X'_i + \Delta$, состояние X'_i считается достоверно определенным.

$$\tilde{U}_{x,s} = \left\{ \left((X'_i, S_j) \mid \mu_{\{x,y\}}(X'_i, S_j) \right) \mid X'_i \in X', S_j \in S, \mu(X'_i, S_j) \in \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \right) \right); : \right\} \quad (7)$$

– нечеткое отношение между множеством X' и множеством детерминированных состояний элементов системы S на известных параметрах $\{x, y\}$, где $\mu_{\{x,y\}}(X'_i, S_j)$ – функция

принадлежности X'_i к S_j (Далее обозначим $\mu(X'_i, S_j)$). Применительно к сенсорно-сетевым моделям, эту функцию можно определить аналогично (5) как меру близости между векторами параметров системы $\{x, y\}$ при состоянии X'_i и состоянии S_j . Причем, если имеет место функциональная зависимость $X'_i(S)$, то $\tilde{U}_{x,s}$ можно интерпретировать как конечный набор нечетких правил отображения $A : S \rightarrow X'_i, X'_i \in X'$.

Введем формулу для оценки погрешности определения состояния:

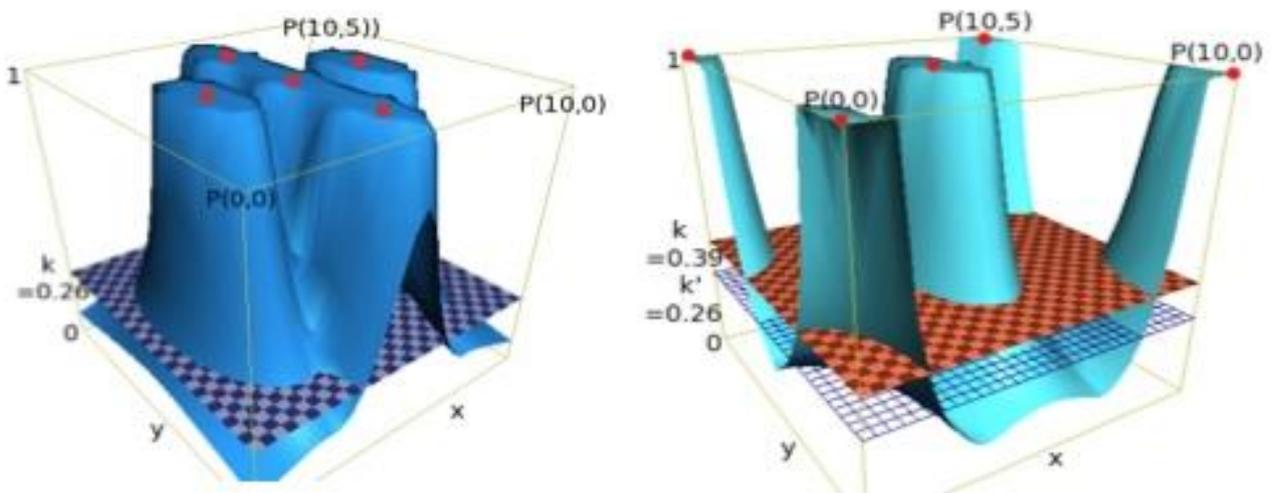
$$\Delta X'_i = \frac{\left[1 - \max_{S_j \in S} \mu(X'_i, S_j)\right]^2}{2} \Delta_{max} \quad (8)$$

$$\Delta_{av} = \frac{[1 - \tilde{k}]^2}{2} \Delta_{max} \quad (8^*)$$

где Δ_{max} – некоторая постоянная норма, за которую принимается разница между верхней и нижней границей возможных состояний системы; \tilde{k} – коэффициент точности построенной модели \tilde{G} (по сути, среднее значение функции принадлежности $\mu((x, y), S_j)$ на всей области определения системы):

$$\tilde{k} = \int_{y \in X'} \int_{x \in X'} \left(\max_{S_j \in S} \mu((x, y), S_j) \right) dx dy / \int_{y \in X'} \int_{x \in X'} 1 dx dy \quad (9)$$

$\max_{S_j \in S} \mu(X'_i, S_j)$ – вероятность того, что состояние X'_i системы может быть достоверно определено на текущем нечетком отношении $\tilde{U}_{X'_i, S}$; тогда Δ_{av} – есть среднее ожидаемое отклонение от реального состояния системы.



а) Менее оптимизированная (число узлов=5) б) Более оптимизированная (число узлов=5)
рис. 1 Сравнение нечетких моделей

Следовательно, задача нахождения наиболее адекватной нечеткой модели сводится к максимизации целевой функции (9). Примеры оптимизации нечеткой модели сенсорно сетевой системы без изменения количества узлов иллюстрированы на рис. 1.

Теорема. Для всякого элемента X'_i универсума X' , с оценкой его погрешности $\Delta X'_i$, не выходящей за интервал Δ , если проекция отношения $\tilde{U}_{x,s}$ на X'_i является нормированным отношением, т.е. функции принадлежности $\forall v(X'_i, S_j), S_j \in S$ порождают взаимодополняющие множества $\tilde{U}_{x,s}$, то значение элемента X'_i эквивалентно интегральной сумме всех мер принадлежности $v(X'_i, S_j)$ по элементам $S_j \in S$.

$$\forall X'_i \in X' : \begin{cases} h_{\tilde{U}_{x,s}} = \sup\{v_{\tilde{U}_{x,s}}(X'_i, S_j)\} = 1 \\ \Delta X'_i \leq \Delta : \\ S_j \in S \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{X'_i \in X', S_j \in S} v_{\tilde{U}_{x,s}}(X'_i, S_j) = 1 \\ \Rightarrow X'_i = M[S]_{X'_i} = \sum_{S_j \in S} S_j v_{\tilde{U}_{x,s}}(X'_i, S_j) \end{array} \right. \quad (10)$$

Доказательство. Имеем пространство мерой (6), с определенной на нем измеримой функцией $v(X'_i, S): (S, \mathcal{F}) \rightarrow (\mathbb{R}, \beta(\mathbb{R}))$, являющейся индикатором измеримого множества S , а так же являющейся простой, что следует из определения (7). Тогда $\{S_j\}_{j=1}^n \subset \mathcal{F}$ - конечное разбиение S на измеримые множества.

Интегрируя измеримую функцию при $X' = X'_i$ по Лебегу имеем:

$$M[S]_{X'_i} = \int_S v(X'_i, S) d\mathcal{F} = \sum_{S_j \in S} v(X'_i, S_j) S_j \quad (11)$$

Наконец, если рассматривать нормированную функцию принадлежности $v(X'_i, S_j)$ как коэффициент подобия, то из условий нормировки $\sum_{X'_i \in X', S_j \in S} v_{\tilde{U}_{x,s}}(X'_i, S_j) = 1$ имеем: $X'_i = M[S]_{X'_i}$, что и требовалось доказать.

Замечание.

Если исходное семейство функций принадлежности $\mu(X', S)$ не удовлетворяет условию нормировки из (10), то их можно нормировать в соответствии со следующей формулой:

$$\forall X'_i \in X', \forall S'_j \in S : v(X'_i, S_j) = \frac{\mu(X'_i, S_j)}{\sum_{S_j \in S} \mu(X'_i, S_j)} \quad (12)$$

Заметим, что лишь существование условия нормировки гарантирует закрытие «пропастей» в нечеткой модели.

Методика решения задачи определения температур на доверительных интервалах в произвольных точках ограниченного пространства

Шаг 1. Пространственно-структурная самоорганизация системы.

На этом шаге необходимо определить текущую структуру системы в пространстве: ориентацию узлов и расстояния между узлами, топологию, инициализировать все узлы системы. Использование конкретных алгоритмов зависит от разных факторов системы (наличие перекрытий, акустика и т.д.), выберем лишь наиболее простые.

Для определения ориентации можно использовать алгоритм AoA (см. рис. 2), суть которого заключается в измерении фазы или временного интервала между приемами звукового сигнала на различных узлах [10].

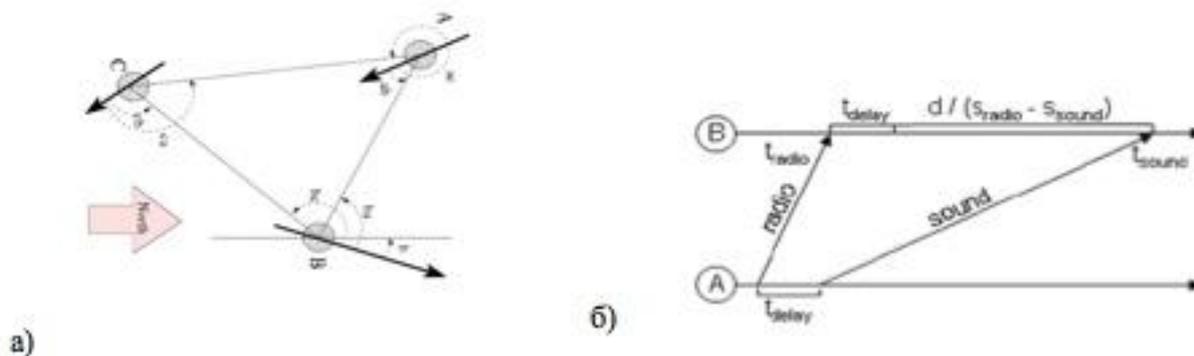


рис. 2 Иллюстрация алгоритма AoA

Для определения расстояний между узлами можно использовать алгоритм TDoA, суть которого заключается в замере времени прохождения радиосигнала и последовательности звуковых сигналов между всеми парами узлов.

Шаг 2. Инициализация системы.

Определим S из (1), как множество датчиков-индикаторов температуры (Q из (1)).

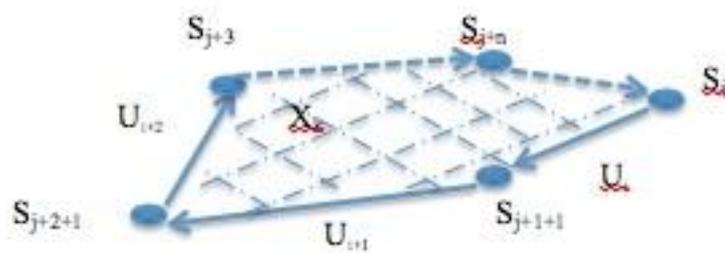


рис. 3 Представление сенсорно-сетевой системы в виде графа

Тогда U из (1) является замкнутым множеством связей графа G . Теперь исходную систему можно представить в виде графа G в соответствии с (1), с параметрами (2), (3), (4) (см. рис. 3). Мерой значимости связей или весом дуг графа G в соответствии с (5) является некоторая функция близости вершин, ψ -функция. Применительно к сенсорным системам:

$$\psi(s_{i,k}^x, s_{j,k}^x) = \left| \begin{matrix} s_i^x & - & s_j^x \\ s_i^y & - & s_j^y \end{matrix} \right|^{-2} \tag{13}$$

Выбор вида функции (6) обусловлен тем фактом, что энергия сигнала, посылаемого одним узлом сети убывает пропорционально квадрату расстояния [9]. Таким образом, при значениях ниже некоторого (зависит от технической спецификации сенсоров) ψ_{min} , U_{S_i, S_j} выпадает из множества U .

Шаг 3. Построение нечеткой модели

В соответствии с (6), определим отношение $\tilde{U}_{x,s}$ в виде матрицы смежности.

$$\tilde{U}_{x,s} = \begin{bmatrix} & S_1 & \dots & S_n \\ X_1 & \mu_{X'_1, S_1} & \dots & \mu_{X'_1, S_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_m & \mu_{X'_m, S_1} & \dots & \mu_{X'_m, S_n} \end{bmatrix}$$

Определим функцию принадлежности из (7) аналогично (5) как некоторую функцию меры пространственной близости:

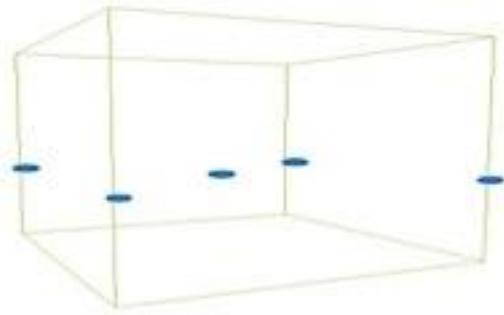
$$\mu_{\{x,y\}}(X'_i, S_j) = e^{-\frac{\left| \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} s_j^x \\ s_j^y \end{pmatrix} \right|^2}{2 \cdot \sigma_{S_i}^2}} \quad (14)$$

где $\sigma_{S_i}^2$ – это некоторая область, $\Delta x \times \Delta y$, $\Delta x = \Delta y = \sigma_{S_i}^2$, в которой состояние S_i остается детерминированным (область работы термодатчиков с незначительной погрешностью). Выбор вида функции (14) обусловлен высокой степенью сглаживания и аналогией с функцией нормального распределения вероятности, при которой узел системы с местоположением $\langle s_i^x, s_i^y \rangle$ окружен экспоненциально убывающим полем, с градиентом направленным в его же сторону. Благодаря таким свойствам, близкие точки будут обладать большей значимостью своих связей в графе.

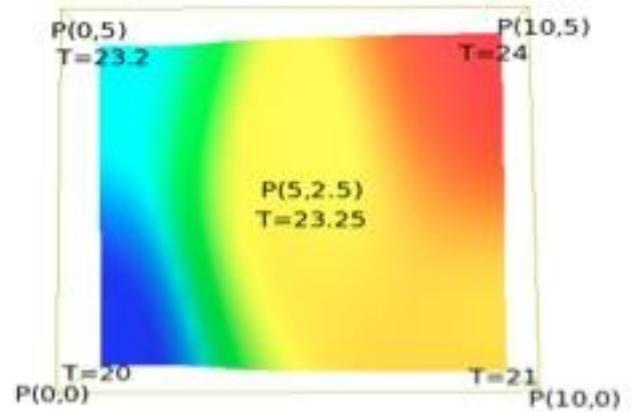
Проведем операцию нормировки функций принадлежности, воспользовавшись (12).

$$\forall S'_j \in S : v(X'_i, S_j) = \frac{\mu(X'_i, S_j)}{\sum_{S_j \in S} \mu(X'_i, S_j)} = e^{-\frac{\left| \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} s_j^x \\ s_j^y \end{pmatrix} \right|^2}{2 \cdot \sigma_{S_i}^2}} \bigg/ \sum_{S_j \in S} e^{-\frac{\left| \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} s_j^x \\ s_j^y \end{pmatrix} \right|^2}{2 \cdot \sigma_{S_i}^2}} \quad (15)$$

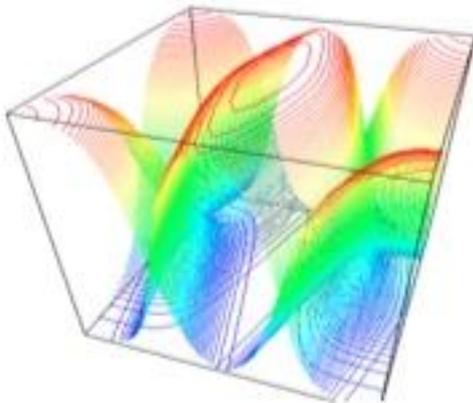
Как можно заметить, теперь функция $v_{\tilde{U}_{x,s}}(X'_i, S_j)$ определена на всей области определения X' и асимптотически стремится к нулю в направлении всякого вектора $\overrightarrow{S_j S_k}$, где $S_k \in S$, $S_k \neq S_j$.



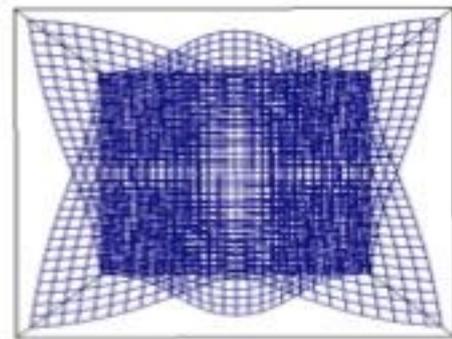
а) Расположение сенсоров в пространстве



г) Результат моделирования



б) Нормированное распределение функций принадлежности



в) Усиление суперпозиции функций принадлежности

рис. 4 Построение нечеткой модели (4 сенсора, расположенных в углах в комнаты)

В итоге имеем следующее семейство поверхностей (см. рис. 4), наглядно демонстрирующих аппроксимирующие свойства полученной нечеткой модели.

Шаг 4. Расчет модели. Все готово для определения состояния моделируемой системы при произвольных её параметрах. А именно, для расчета температуры Q в произвольной точке, воспользуемся теоремой (10):

$$X'_i = Q(X'_{i_x}, X'_{i_y}) = M[Q(S)]_{X'=X'_i} = \sum_{S_j \in S} Q(S_j) v_{\tilde{Q}_{x,s}}(X'_i, S_j) \quad (16)$$

В результате решения исходной задачи имеем поверхность распределения температур в произвольном сечении 3-х мерного пространства (см. рис. 5 (г)).

Экспериментальная апробация метода.

Для испытания метода, в силу недоступности реальных сенсорных систем и их дороговизны для проведения тестов, была разработана программная имитационная модель распределения теплоты в комнате размерами 10 на 5 метров. Схема сенсорной системы идентична рис. 5 (а). Из 5 узлов сенсорной сети, 1 находился в режиме тестера и не включался в модель.

Значения модели для локации узла-тестера сравнивались с показателями самого тестера. Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытания системы.

N	time, min	T real	T modeled	RMSE	SMAPE
5	1	17,00	16,76	0,1697056	0,007109005
	2	17,47	16,98	0,3464823	0,014223512
	3	18,21	17,81	0,2828427	0,011104942
	4	19,04	18,54	0,3535534	0,013304949
	5	19,89	19,68	0,1484924	0,005307051
	6	20,37	20,02	0,2474874	0,008665511
	7	21,11	20,89	0,1555635	0,005238095
	8	21,02	21,07	0,0353553	0,001187931
	9	20,23	20,54	0,2192031	0,00760363
	10	19,10	19,81	0,5020458	0,018247237
10	1	18,23	18,55	0,2262742	0,008700381
	2	19,11	19,02	0,0636396	0,002360346
	3	21,35	21,19	0,1131371	0,003761166
	4	23,18	23,12	0,0424264	0,001295896
	5	21,50	21,34	0,1131371	0,003734827
	6	20,01	20,13	0,0848528	0,002989537
	7	18,88	19,01	0,0919239	0,003430984
	8	17,90	17,96	0,0424264	0,001673173
	9	17,03	17,07	0,0282843	0,001173021
	10	16,54	16,68	0,0989949	0,004214329

Как видно из результатов, при меньшем кол-во узлов, модель «запаздывает» в определение температуры в искомой точке, в силу того, что изменение показаний далеко расположенных от этой точки сенсоров требует времени. При большем охвате сенсорной сети, это время и отклонения результатов меньше.

Выводы

Предложенная методика эффективно справляется с задачей определения температуры в произвольной точке произвольного подпространства(здания, склада, комнаты) в условиях неполного охвата сенсорными сетями. При сильной нестабильности моделируемой системы в статике(хаотично локализованные сильные перепады температур в пределах рассматриваемого подпространства в случайный момент времени), нечеткая модель будет наименее эффективна, так как её аппроксимирующие свойства при неоптимальном охвате сенсорной сетью потеряют влияние на результат (благодаря вводу доверительных интервалов) и конечный результат будет зависеть исключительно от меры точности модели(карты локализации и количества узлов сенсорной сети). В случае отсутствия доверительных интервалов, конечные результаты будут маловероятны и, вообще говоря, еще дальше от реальных из-за вносимых погрешностей, на основе неоптимальных аппроксимаций. Методика на базе нечеткого моделирования позволит существенно сократить энергозатраты

на отопление и охлаждение, в особенности, крупных промышленных объектов, дата-центров, торгово-развлекательных и деловых центров.

Применение методики не ограничивается на решении задачи определения температуры в произвольной точке здания. Методика расширяема и особенно интересна для моделирования динамики систем, в частности таких, как гибридные энергетические системы [7], где определенно может стать алгоритмическим базисом отдельного агента в мультиагентной системе моделирования.

Литература

1. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств — М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.
2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы - М.: Горячая линия -Телеком, 2006. - 452 с.
3. Brown J. G. - A Note on Fuzzy Sets. Inform, and Control. vol. 18, С. 32-39, 1971.
4. Борисов А. Н., Вульф Г. Н., Осис Я. Я. Применение теории размытых множеств к идентификации состояния сложных систем. // Кибернетика и диагностика. - 1972. - №5. С. 135-147.
5. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E., Wireless Sensor Networks: A Survey // IEEE Computer Networks. 2002. vol 38. № 4. С. 393-422.
6. Niculescu D., Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA // INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies. 2003. vol. 3. №1. С. 1734-1743.
7. Щербаков М.В. Набиуллин А. С. Камаев В.А. Мультиагентная система моделирования производства и потребления электроэнергии в гибридных энергетических системах. // Инженерный вестник Дона. - 2012. - №2. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/775/> доступ свободный