

Показатели эффективности беспроводной сенсорной сети с прямоугольной решетчатой структурой

В. В. МАКАРОВ, С. Ю. ПОТОМСКИЙ

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия, e-mail: spotomskiy@hse.ru

Исследована беспроводная сенсорная сеть с прямоугольной решетчатой структурой и числом кластеров интеллектуальных датчиков от 20 до 260. Оценены вероятность безотказной работы и длительность цикла опроса сети.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, кластер, интеллектуальный датчик.

The wireless sensor network with rectangular grating structure with from 20 to 260 number of clusters of smart sensors has been studied. The probability of non-failure operation, a cycle of survey duration have been estimated.

Key words: wireless sensor network, cluster, smart sensor.

Беспроводные сенсорные сети (БСС) широко применяются в составе информационно-измерительных систем (ИИС). К достоинствам БСС относятся: низкая себестоимость (по сравнению с проводными линиями связи); высокая надежность передачи сообщений вследствие использования цифровых каналов связи, избыточной структуры и самоорганизации сети; гибкость перестройки состава, структуры и рабочих характеристик [1].

Существуют следующие структуры БСС: звезда, дерево, решетка, позвоночник и др. Одной из самых распространенных является прямоугольная решетчатая структура с равномерно распределенными ретрансляторами сообщений и кластерами интеллектуальных датчиков (ИД). Такая структура часто встречается в ИИС для контроля состояния зданий, промышленных сооружений и конструкций, складов, технологических линий и др. Частный случай подобной структуры с небольшим числом узлов сети исследован в [2]. В настоящей статье предложен алгоритм опроса, исследованы показатели эффективности БСС с прямоугольной решетчатой структурой и числом кластеров ИД от 20 до 260. Эти показатели в большой степени определяют надежность, быстродействие, точность измерений, экономичность сети, входящей в состав ИИС.

Структура сети. В состав БСС входят: центральный контроллер (ЦК); ретрансляторы сообщений; кластеры ИД. Центральный контроллер управляет работой сети, собирает и обрабатывает измерительную информацию. Ретрансляторы осуществляют взаимный обмен командами узлов сети, измерительной и статусной информацией. Ретрансляторы выбирают маршруты передачи сообщений по сети, хранят информацию о множестве возможных путей их локальной передачи, временно блокированных линиях связи и текущих оптимальных маршрутах. Кластеры выполняют сбор и первичную обработку измерительной информации, представляемой в цифровой форме. Беспроводную передачу данных осуществляют с помощью радиолиний связи, широко рас-

пространенных технологий и протоколов Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi и др. [3].

Структурная схема БСС с прямоугольной решетчатой структурой представлена на рис. 1. Центральный пункт ЦП ИИС связан с ЦК сети проводной или беспроводной линией связи. В состав сети входит решетка ретрансляторов сообщений P , около каждого из которых располагается кластер с количеством ИД, равным k . Сплошными линиями обозначены радиолинии связи соседних ретрансляторов между собой и с ЦК. Расстояние r между соседними по диагонали ретрансляторами называется расстоянием доступа. Достоверная передача сообщений гарантируется на расстояния между ретрансляторами, не превышающие r . При больших расстояниях мощность принимаемого сообщения находится ниже порога восприятия приемника и сообщение теряется. Ретрансляторы сообщений образуют матрицу размером $m \times n$. На рис. 1 указаны координаты некоторых ретрансляторов сообщений $P(i, j)$, где $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$ — номера горизонтального и вертикального рядов матрицы. Для простоты рассуждений полагаем, что ретрансляторы и кластеры ИД равномерно распределены в сети. Количество кластеров n_k и ретрансляторов n_p одинаково и $n_p = n_k = mn - 1 = N$; $n_{ид} = kN$.

Применим для БСС понятие «страты» — это множество узлов, достижимое за одинаковое число тактов (шагов) из ЦК. Так, первую страту образуют восемь узлов сети, расположенных на расстоянии доступа от ЦК. Рассмотрим способы снижения энергетических затрат в узлах. Последние в любой момент времени находятся в одном из двух состояний — сон (с пониженным потреблением электрической энергии) или бодрствование (выполнение рабочих операций). Например, кластер ИД пробуждается на время сбора и обработки измерительной информации, а после этого переходит в состояние сна.

Наиболее экономична передача сообщений на короткие расстояния. Уменьшение r повышает экономичность и срок

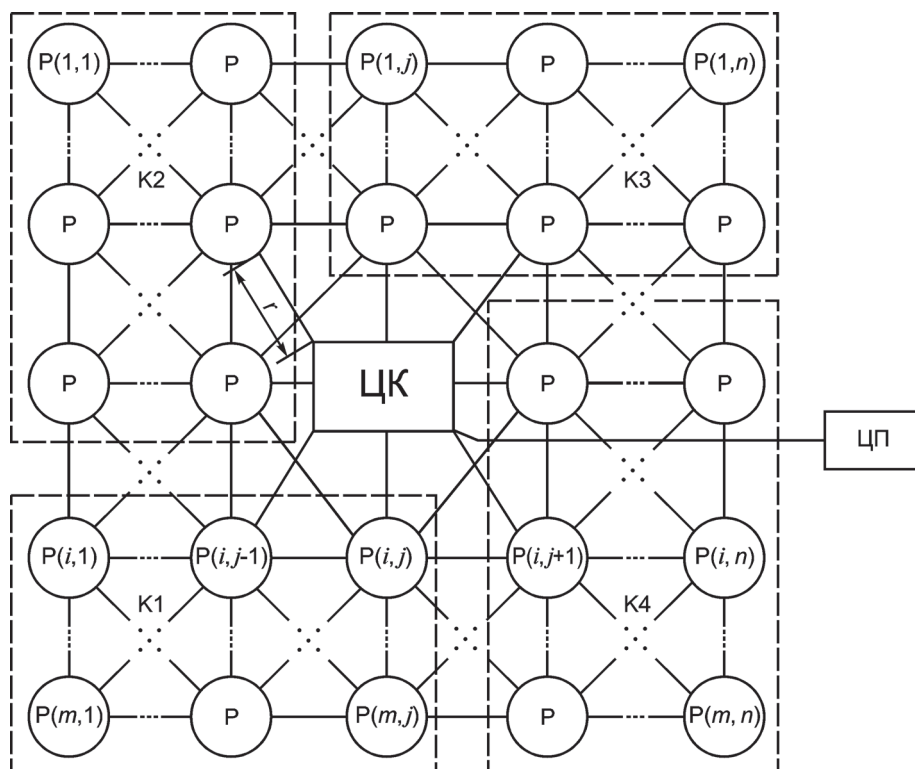


Рис. 1. Структурная схема ИИС с прямоугольной решетчатой структурой:

ЦП — центральный пункт; *ЦК* — центральный контроллер; *P* — ретранслятор сообщений;
r — расстояние доступа; *K1—K4* — кварталы сети

службы устройств БСС, однако возрастает количество ретрансляторов и кластеров ИД, а также стоимость сети. Выбор значения r требует разумного компромисса.

С целью сокращения цикла опроса желательно использовать бесконфликтную стратегию передачи сообщений в сети. Маршруты такой передачи многовариантны: команда от ЦК может быть передана в соседние ретрансляторы по восьми различным направлениям (см. рис. 1).

Надежность работы сети. В ИИС возникают отказы ЦК, кластеров ИД, ретрансляторов сообщений, радиолиний связи. Первые три из них окончательны и невосстанавливаемы. Наиболее критичны отказы ЦК, которые приводят к потере работоспособности ИИС; предотвратить это можно резервированием контроллера. Отказы кластеров и ретрансляторов приводят к потере работоспособности отдельных узлов сети. Сообщения об отказах поступают в ЦК и в дальнейшем эти узлы не опрашиваются; остальная часть сети остается в рабочем состоянии. Отказы радиолиний не так критичны, так как ретрансляторы способны изменять маршруты обхода узлов сети. Например, после отказа линии связи ретрансляторов $P(i, j)$, $P(i, j-1)$ (см. рис. 1) возможны следующие варианты обхода сети:

$$P(i,j) \rightarrow P(i+1,j) \rightarrow P(i,j-1) \text{ или } P(i,j) \rightarrow P(i+1,j-1) \rightarrow P(i,j-1).$$

Оценим вероятность безотказной работы сети $P_6(N)$ с числом узлов N за время T_p . Для простоты полагаем, что ретрансляторы и кластеры ИД имеют одинаковые характеристики. Обозначим вероятности безотказной работы устройств сети: центрального контроллера — $P_{1\text{К}}$, ретрансля-

тора сообщений — P_{PC} ; кластера ИД — P_{K} ; линии связи — $P_{\text{ЛС}}$. Считаем отказы взаимно независимыми и невозстанавливаемыми, возможность восстановления линии связи после ее отказа за время работы сети не учитываем. Количество всех узлов сети равно $(N + 1)$; центральный узел — это ЦК; число внутренних узлов — $\{N - 2(n + m - 2)\}$, граничных неугловых узлов — $2(n + m - 4)$, граничных угловых узлов — 4.

Безотказная работа сети гарантируется при выполнении следующих условий: безотказная работа центрального контроллера (условие 1), N ретрансляторов сообщений и N кластеров ИД (условие 2), не менее двух линий связи, инцидентных каждому граничному угловому узлу сети (условие 3), и не менее четырех, инцидентных каждому неугловому (условие 4), не менее пяти линий связи, инцидентных каждому внутреннему или центральному узлу сети (условие 5). В процессе опроса сети условие 3 гарантирует вход и выход маршрута опроса из граничного углового узла, условие 4 — из граничного неуглового узла и переход на соседнюю страту, а условие 5 — вход и выход маршрута опроса из внутреннего узла и переход на любую из двух соседних страт.

Из теории вероятностей найдем выражение вероятности безотказной работы сети с числом узлов N :

$$P_6 = P_{\text{ЦК}}(P_{\text{ПК}}P_{\text{К}})^N \left[\sum_{I=5}^8 C_8^I P_{\text{ПЦ}}^I (1 - P_{\text{ПЦ}})^{8-I} \right]^{N-2(n+m)+5} \times \\ \times \left[\sum_{I=4}^5 C_5^I P_{\text{ПЦ}}^I (1 - P_{\text{ПЦ}})^{5-I} \right]^{2(n+m-4)} \left[\sum_{I=2}^3 C_3^I P_{\text{ПЦ}}^I (1 - P_{\text{ПЦ}})^{3-I} \right]^4, \quad (1)$$

где C — число сочетаний из L по I , $I=1, \dots, 8$; $L=3$, или 5, или 8.

Для примера определим вероятность P_6 для сети со следующими характеристиками: $P_{\text{цк}} = 0,99$; $P_{\text{pc}} = P_{\text{к}} = 0,9999$; $P_{\text{лс}} = 0,98$. Значения P_6 получены для $N = 24 \dots 255$ и приведены в таблице. Зависимость $P_6(N)$ представлена на рис. 2 линией 3.

Показатели эффективности сети для разного числа узлов N

Показатели эффективности	N						
	24	48	80	120	168	224	255
P_6	0,936	0,903	0,870	0,837	0,803	0,770	0,753
P_6^*	0,974	0,960	0,948	0,933	0,916	0,900	0,890
$P_D(0,9N)$	0,980	0,970	0,963	0,955	0,947	0,940	0,936
$T_{ц.0}, c$	0,140	0,220	0,310	0,440	0,580	0,750	0,850

С ростом числа N вероятность безотказной работы сети снижается по закону, близкому к линейному. Большое влияние на значение P_6 оказывают в порядке значимости вероятности безотказной работы ретранслятора сообщений, кластера ИД, линий связи. Меньшее влияние оказывает вероятность безотказной работы ЦК: увеличение их числа и горячее резервирование не приводят к заметному повышению надежности работы сети.

Оценим повышение значений P_6 при увеличении вероятности $P_{ЛС}$. Оставив неизменными значения $P_{РС}$, P_K , $P_{ЦК}$, примем $P_{ЛС} = 0,99$. Полученные при этом значения вероятности безотказной работы сети P_6^* приведены в таблице, а зависимость $P_6^*(N)$ — на рис. 2 линией 2.

Отказ M узлов сети не приведет к потере ее работоспособности, если восстановить утраченные данные интерполяцией по результатам измерений в соседних работоспособных узлах. Обозначим долю таких узлов $\alpha = 1 - MN$. Оценку снизу вероятности сохранения работоспособности сети $P_p(\alpha N)$ с αN исправными узлами получим с помощью выражения (1), в котором оставим неизменными содержащие квадратные скобки сомножители с третьего по пятый, независимо от числа отказавших узлов.

Вероятность сохранения работоспособности сети гарантируется безотказной работой: ЦК; N узлов сети, или $(N - 1)$ узлов при вышедшем из строя одном или $(N - 2)$ при двух узлах, или $(N - M)$ узлов при вышедших из строя M узлах; линий связи, указанных в приведенных выше условиях 3—5.

Также получим выражение вероятности сохранения работоспособности сети $P_p(\alpha N)$ при количестве исправных узлов не менее αN :

$$P_p(\alpha N) = P_6(N) \left[1 + \sum_{j=1}^M C_N^j ((1 - P_{РС} P_K) / (P_{РС} P_K))^j \right].$$

Значения вероятностей $P_p(0,9N)$, рассчитанные при $P_{ЦК} = P_{ЛС} = 0,99$, $P_{РС} = P_K = 0,9999$ и отказах 10 % узлов, также приведены в таблице. Восстановление измерительной информации с помощью линейной интерполяции позволяет с определенной вероятностью сохранять работоспособность сети, несмотря на снижение требований к надежности ее узлов.

Алгоритм опроса сети. Основная решаемая в БСС задача — сбор измерительной информации с кластеров ИД. Рассмотрим непрерывный циклический равномерный опрос кластеров, выполняемый под управлением и по инициативе ЦК сети.

Длительность цикла опроса $T_{ц.о.}$ является основным показателем быстродействия сети. Она определяет период равномерного опроса любого из ИД сети T_0 и динамические погрешности измерений физических величин в ИИС $T_0 = T_{ц.о.}$. Алгоритм должен обеспечивать минимально возможную длительность $T_{ц.о.}$.

Далее рассмотрим конвейерный алгоритм непрерывного циклического равномерного опроса кластеров ИД сети, разработанный с учетом возможных отказов ее отдельных устройств. При изложении алгоритма воспользуемся некоторыми упрощающими предположениями: отказы устройств сети отсутствуют; характеристики кластеров одинаковы — в кластере число ИД равно k ; разрядности результатов изме-

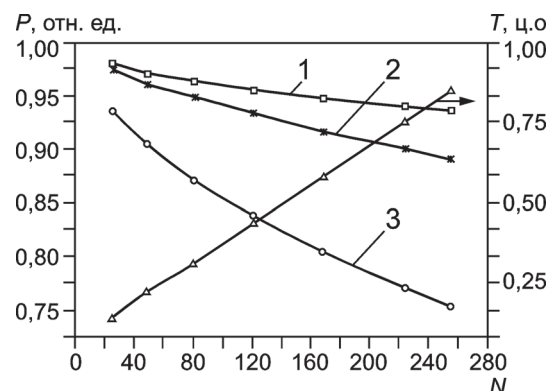


Рис. 2. Показатели эффективности сети P_p , P_6^* , P_6 — соответственно, линии 1—3; N — число узлов сети; $T_{ц.о.}$ — длительности цикла опроса

рений всех физических величин равны p . Покрываемая и контролируемая сетью ИД область (см. рис. 1) разбита на четыре квартала $K1—K4$, обозначенные пунктирными линиями. При четном числе N размеры кварталов одинаковы и каждый из них содержит по $N/4$ ретрансляторов и кластеров ИД.

Цикл опроса начинается с квартала $K1$ подачей команды из ЦК на ближайший ретранслятор $P(i, j)$ для выполнения измерений, а заканчивается приемом ЦК пакета данных (результатов измерений), пришедших из последнего в маршруте опроса ретранслятора $P(i, j+1)$ квартала $K4$. Таким образом, результаты, полученные во всех узлах сети, передаются в ЦК, где проходят окончательную обработку. Результаты этой обработки передают в центральный пункт ИИС.

Маршрут опроса кластеров ИД сети начинается с квартала $K1$ и проходит по вертикальной ЦК $\rightarrow P(m, j)$, горизонтальным цепям $P(m, j-1) \rightarrow P(m, 1)$, $P(m-1, 1) \rightarrow P(m-1, j-1)$ и т. д., заканчиваясь проходом по горизонтальной цепи $P(i, 1) \rightarrow P(i, j-1)$ и ветви $P(i, j-1) \rightarrow ЦК$.

Назовем начальным тактом время перехода по одному ребру сети из ЦК в соседний с ним ретранслятор сообщений, например $P(i, j)$. Чтобы уменьшить $T_{ц.о.}$ и предотвратить конфликты при передаче сообщений, опрос квартала $K2$ начинают с запаздыванием на один начальный такт по сравнению с $K1$.

Маршрут опроса квартала $K2$ проходит по горизонтальным цепям ЦК $\rightarrow P(i-1, 1)$, $P(i-2, 1) \rightarrow P(i-2, j-2)$ и т. д., заканчиваясь проходом по вертикальной цепи $P(1, j-1) \rightarrow P(i-2, j-1)$ и ветви $P(i-2, j-1) \rightarrow ЦК$. Опрос квартала $K3$ запаздывает на два, а квартала $K4$ — на три начальных такта по сравнению с $K1$. Благодаря такой организации $T_{ц.о.}$ ограничена выражением

$$T_{ц.о.} = T_1 + 3T_n, \quad (2)$$

где T_1 — длительности опроса одного квартала; T_n — длительность начального такта.

В начальном такте ЦК посылает команду «Выполнить измерения» (КВИ) в ретранслятор $P(i, j)$. Последний просывается, подтверждает ЦК прием команды, запускает измерения в кластере и, получив от него результаты измерений, формирует из них пакет данных. Затем пакет данных и КВИ посылаются в ретранслятор $P(i+1, j)$. Ретранслятор $P(i, j)$ получает из $P(i+1, j)$ подтверждение приема сообщения и

вместе с кластером ИД переходит в состояние сна. И так, в процессе диалога соседних ретрансляторов один из них $P(s)$ посылает КВИ в другой $P(s+1)$. Последний просыпается и посылает в $P(s)$ подтверждение приема команды, $P(s+1)$ запускает измерения в кластере ИД и принимает из $P(s)$ текущий пакет данных о собранных к этому моменту времени результатах измерений и посылает в $P(s)$ подтверждение об их получении. После окончания измерений в кластере ИД ретранслятор $P(s+1)$ формирует новый пакет данных, добавляя в него новые результаты измерений. Этот пакет данных и команда КВИ посылаются в следующий ретранслятор $P(s+2)$, а $P(s+1)$, получив подтверждение из $P(s+2)$ о приеме сообщения, совместно с кластером ИД переходит в состояние сна.

Расчет длительности цикла опроса сети. Время выполнения операций в сети обозначим так: t_c — переход ретранслятора и кластера в состояние сна; $t_{пр}$ — их пробуждение; $t_{к.и}$ — передача (прием) КВИ; t_n — прием (передача) подтверждения о приеме сообщения; t_d — передача (прием) текущего пакета данных; t_i — выполнение всех измерений в кластере ИД; t_f — формирование текущего пакета данных.

Временные диаграммы обмена сообщениями между соседними узлами сети приведены в [2]. Длительности передач КВИ из ЦК в соседний ретранслятор $t_{ЦК-P}$ и сообщения об окончании опроса квартала и текущего пакета данных из ретранслятора в ЦК $t_{P-ЦК}$ следующие:

$$t_{ЦК-P} = t_{к.и} + t_{пр} + t_n + t_i + t_f; \quad t_{P-ЦК} = t_{к.и} + t_n + t_d + t_n + t_c. \quad (3)$$

Время передачи в соседний ретранслятор КВИ, текущего пакета данных и запуска измерений в кластере составляет

$$t_{P-P} = t_{к.и} + t_{пр} + t_n + \max\{t_i; t_d\} + t_n + t_f + t_c. \quad (4)$$

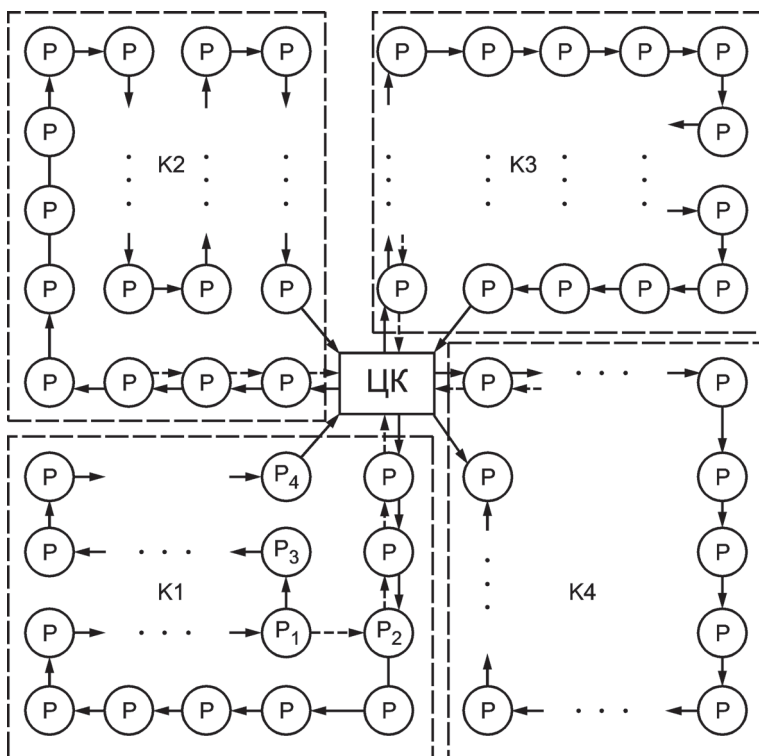


Рис. 3. Модифицированный конвейерный алгоритм опроса БСС

Для примера рассмотрим однородную сеть с числом узлов N , $k = 5$, разрядностью результатов измерений $p = 16$. Длительности выполнения операций и скорость передачи сообщений v по линиям связи выбраны такими: $t_{к.и} = 0,4$ мс; $t_c = t_{пр} = 1$ мс; $t_n = 0,35$ мс; $t_i = 10$ мс; $t_f = 0,1$ мс; $v = 250$ кбод. Длительность передачи пакета данных, содержащего G байтов результатов измерений, составляет $t_d = 0,32 + 0,032G$ при условии ограничения $G \leq 240$ байт. Таким образом, пакеты данных могут содержать результаты измерений, полученные не более чем в 24 узлах сети. Максимальное время

передачи пакета $t_d^{\max} = 8$ мс при $G = 240$ байт. В связи с ограничением G предложен модифицированный конвейерный алгоритм опроса. Рассмотрим сеть (рис. 3) с параметрами $m = n = 9$; пути передачи КВИ и текущих пакетов данных изображены сплошными стрелками, а пути возврата пакетов данных в ЦК пунктирными.

Маршрут опроса начинается с квартала $K1$ и проходит по выходящей из ЦК вертикальной цепи, далее по двум нижним горизонтальным цепям ретрансляторов. Из P_1 пакет данных передается в P_2 и потом по вертикальной цепи в ЦК. Текущий пакет данных очищается, КВИ посылается из ретранслятора P_1 в P_3 и опрос $K1$ продолжается. Заканчивается опрос передачами из P_4 в ЦК сообщения об его окончании и текущего пакета данных. Как было отмечено ранее, опрос кварталов $K2-K4$ начинается с запаздыванием на длительности 1–3-начальных тактов относительно $K1$. Опрос сети заканчивается после опроса квартала $K4$.

Найдем значение $T_{ц.о}$ в (2) при $N = 24 \dots 255$. Для простоты рассуждений представим матрицу ретрансляторов симметричной, а значения m , n — нечетными. Количество тактов при опросе одного квартала находят как (см. рис. 3):

$$N_t = m + (n - 3)(m - 1)/4. \quad (5)$$

Используя приведенные выше численные значения длительностей операций, $t_d^{\max}$ и (3), (4), определяем $t_{ЦК-P} = 11,85$ мс; $t_{P-ЦК} = 9,2$ мс; $t_{P-P} = 12,2$ мс. С учетом равенства $m = n$ и (5), после ряда преобразований получим длительность опроса одного квартала

$$T_1 = (N_t - 2)t_{P-P} + t_{ЦК-P} + t_{P-ЦК} = 21,05 + 3,05(m^2 + 3).$$

С учетом $T_n = t_{ЦК-P}$, $N = mn - 1$ из (2) имеем

$$T_{ц.о} = T_1 + 3t_{ЦК-P} = 56,6 + 3,05(N + 4). \quad (6)$$

Найденные по (6) значения длительности цикла опроса сети приведены в таблице и на рис. 2. Длительность нахождения узлов сети в рабочем состоянии одинакова для всех узлов за исключением ЦК. Последнее обстоятельство не влияет на экономичность работы сети. Доля времени нахождения узла в активном рабочем состоянии в течение цикла опроса $d_{a,c} = t_{P-P}T_{ц.о} = (1,5 \dots 8,6) \%$ в зависимости от N .

Выводы. В результате проведенных исследований БСС с прямоугольной решетчатой структурой получены аналитические выражения вероятностей безотказной работы сети и сохранения ее работоспособности в течение заданного интервала времени. Предложен модифи-

цированный конвейерный алгоритм опроса сети, существенно уменьшающий длительность цикла опроса и повышающий экономичность сети вследствие снижения времени нахождения ее узлов в активном рабочем состоянии. Приведены аналитические выражения длительности цикла опроса, доли времени нахождения узлов сети в активном рабочем состоянии, показателей эффективности БСС с прямоугольной решетчатой структурой и модифицированный конвейерный алгоритм циклического равномерного опроса, которые найдут применение при проектировании ИИС и систем автоматического управления.

Л и т е р а т у р а

1. **Нейджел Д. Дж.** Беспроводные сети интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. 2002. № 6. С. 51—58.
2. **Макаров В. В., Володин С. М.** Алгоритм конвейерного циклического опроса беспроводной сенсорной сети // Датчики и системы. 2014. № 2. С. 16—20.
3. **Аникин А. П.** Обзор современных технологий беспроводной передачи данных // Беспроводные технологии. 2011. № 4. С. 6—12.

Дата принятия 05.06.2015 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.786.3

Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии

П. А. ПАВЛОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, e-mail: pavl-petr@yandex.ru

Рассмотрена упрощенная процедура кросс-калибровки, используемая в лазерном динамическом гониометре, когда шаг углового перемещения исследуемого датчика угла превышает его дискретность. Полученная методическая погрешность при M равномерных угловых перемещениях датчика угла определяется суммарной амплитудой M -й гармоники и кратных ей гармоник систематической погрешности гониометра. Экспериментально доказано, что при шаге угловых перемещений датчика угла менее 120° методическая погрешность не превышает $0,01''$.

Ключевые слова: датчик угла, лазерный динамический гониометр, кросс-калибровка.

A simplified cross-calibration procedure used in a dynamic laser goniometer, when the angular displacement step of the studied angle sensor exceeds its discreteness are considered. It is shown that the methodical error of this procedure with M angular displacement steps of the angle sensor is determined by the total amplitude of M -harmonic and by multiples of harmonics of the dynamic laser goniometer systematic error. It is proved experimentally that when the angular displacement step of the angle sensor is less than 120° the methodical error does not exceed $0,01''$.

Key words: angle sensor, laser dynamic goniometer, cross-calibration.

Метод кросс-калибровки используют в угловых измерениях для исследования метрологических характеристик датчиков угла (ДУ) [1, 2]. С помощью данного метода можно определить систематические погрешности двух ДУ, участвующих в измерениях, без привлечения дополнительных средств. Метод предполагает последовательность угловых перемещений испытуемого ДУ относительно другого на углы, определяемые дискретностью датчика с учетом, что систематическая погрешность при угловом перемещении на угол 2π равна нулю. В результате измерений получают массив данных размером $P \times P$, где P — число угловых перемещений. Для призм с небольшим числом граней измерения углов занимают ограниченное время, и процесс вычисле-

ний не представляет особых проблем. Однако, если у испытуемых ДУ дискретность составляет десятки угловых секунд, то метод кросс-калибровки применить затруднительно.

В статье рассмотрена особенность указанного метода применительно к лазерной гониометрии, где в качестве ДУ используют вращающийся с квазипостоянной скоростью кольцевой лазер (КЛ) [3]. Исследуемый ДУ устанавливают на вал лазерного динамического гониометра (ЛДГ). Измерения начинают с первого штриха ДУ после прохождения сигнала нулевой метки ЛДГ. В процессе кросс-калибровки измерения повторяют после каждого перемещения датчика относительно КЛ на угол, определяемый дискретностью ДУ.