

УДК 629.735.33

ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Ю. Н. Артеменко,

канд. техн. наук, заведующий отделом
Астрокосмический центр ФИАН

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Дубаренко,

доктор техн. наук, профессор

М. С. Дорошенко,

младший научный сотрудник

А. Ю. Кучмин,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Институт проблем машиноведения РАН

Рассматриваются возможные варианты архитектуры локальной вычислительной сети для реализации алгоритмов управления зеркальной системы крупного полноповоротного радиотелескопа миллиметрового диапазона радиоволн.

Ключевые слова — радиотелескоп, система управления, локально-вычислительная сеть, системы реального времени.

Введение

Развитие современной радиоастрономии в миллиметровом диапазоне радиоволн и дальней космической связи возможно лишь на основе создания крупногабаритных прецизионных и полностью автоматизированных антенных комплексов, способных работать в широком диапазоне частот с практически полным обзором небесной сферы. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают полноповоротные зеркальные радиотелескопы (РТ), обеспечивающие получение больших коэффициентов усиления и высокой разрешающей способности. Это позволяет принимать радиоизлучения небесных объектов (в Солнечной системе, Галактике и Метагалактике) и исследовать их характеристики: координаты источников, пространственные структуры, интенсивности излучений, спектры и поляризации.

Проблемы управления большими радиотелескопами и методы их решения, а также структура антенного комплекса рассматривались на примере радиотелескопа РТ-70 [1].

В данной статье описываются возможные варианты архитектуры локальной вычислительной сети (ЛВС) для реализации алгоритмов управления элементами радиотелескопа.

Постоянное повышение требований к точности наведения и разрешающей способности РТ миллиметрового диапазона приводит к необходимости использовать более сложные и трудоемкие в вычислительном плане алгоритмы обработки информации и более скоростные каналы передачи информации. Согласно международному опыту, архитектуры систем управления подобными объектами имеют вид многопроцессорной распределенной ЛВС.

Теория и практика применения средств вычислительной техники в системах управления в последнее время наталкиваются на предельные возможности ведения процесса управления в реальном времени с использованием традиционных вычислителей фоннеймановского типа. В настоящее время эта проблема решается путем использования параллельных вычислений и алгоритмов типа «Поток данных». Следовательно, ЛВС

радиотелескопа неизбежно будет содержать компьютеры как классических архитектур, так и нейрокомпьютеры, матричные и др. Вопросы организации параллельных вычислений в указанной сети вычислительным управляющим комплексом (ВУК) и синхронизации обмена информацией между ее удаленными подсистемами являются актуальными.

Радиотелескоп РТ-70 [1], сочетающий основные характеристики крупных радиотелескопов, имеет зеркальную систему по схеме Грегори и представляет собой вариант двухзеркальной антенны с главным зеркалом (ГЗ) параболической формы диаметром 70 м и эллипсоидным контррефлектором (КР). Контррефлектор устанавливается за первичным фокусом, что дает возможность работать из первичного фокуса, не снимая вторичное зеркало. По схеме Грегори строятся лишь длиннофокусные двухзеркальные антенны, в которых к тому же требуется более высокая точность исполнения КР. Длиннофокусные системы также в значительной степени чувствительны к деформациям ГЗ и взаимному положению ГЗ и КР. Излучение от КР фокусируется в тонкий луч и собирается рупорным облучателем с малым углом раскрытия, что обеспечивает более эффективный прием излучения.

Поверхность ГЗ РТ образована щитами трапециевидной формы, максимальный размер которых $2,5 \times 2$ м, общее число щитов 1188 шт. 14 типоразмеров. Щиты имеют специальную конструкцию, позволяющую проводить предварительную юстировку отражающей поверхности в среднем в 50 точках со среднеквадратическим отклонением лучше 50 мкм. Для обеспечения работы РТ в коротковолновой части миллиметрового диапазона форма поверхности ГЗ должна сохраняться во время наблюдений при действии гравитационных, тепловых и ветровых деформаций с точностью 50–70 мкм. С этой целью каждый щит по углам устанавливается на специальных электродомкратах, которые крепятся на ферменном каркасе РТ (как на 100-метровом GBT в США и 50-метровом GTM в Мексике). Число электродомкратов 1440 шт. Во время наблюдений системой управления отслеживается положение каждого щита и при необходимости регулируется их взаимное положение для создания оптимальной формы отражающей поверхности ГЗ (адаптивный метод). Предполагается, что в диапазоне 6 см – 8 мм форма отражающей поверхности будет сохраняться только благодаря использованию гомологического принципа построения ферменного каркаса антенны, а на более коротких волнах необходимо использовать адаптивный метод.

Компенсация изменения фокусного расстояния и положения фокальной оси при наведении

по углу места производится автоматически путем линейного и углового перемещения КР таким образом, чтобы фазовые искажения в раскрыве, вызываемые этим перемещением, полностью компенсировали фазовые искажения, вызываемые деформацией ГЗ. Контррефлектор оснащен пятиступенным приводом, позволяющим КР перемещаться по трем линейным и двум угловым координатам.

Для компенсации ошибок наведения ГЗ и КР предлагается использовать приемник, установленный на подвижную платформу, перемещаемую шестью толкателями. Каждый толкатель состоит из штанги, электродвигателя и шарикоподшипникового винтового домкрата, позволяющего изменять длину толкателя посредством выдвигания штанги. Платформа приемника имеет 5 степеней свободы.

Измерительная система (ИС) состоит из трех уровней:

- система первого уровня обеспечивает периодическую калибровку датчиков гиросtabilизированной платформы по азимуту;

- система второго уровня определяет угловое положение опорного кольца (промежуточной базы) относительно трехосной гиросtabilизированной платформы;

- компоненты системы третьего уровня размещены на опорном кольце в вершине основного зеркала и включают две отдельные подсистемы: первая определяет координаты точек поверхности основного зеркала и является первичным звеном системы адаптации поверхности, вторая измеряет положение КР. Каждая подсистема состоит из однотипных измерительных каналов, реализующих метод «угловой засечки».

Для реализации систем первого и второго уровней используются оптико-электронные автоколлимационные угломеры.

Структура системы управления

Система управления радиотелескопа строится как многоуровневая распределенная система [1, 2]. На нижнем (исполнительном) и среднем уровнях система должна функционировать под управлением операционной системы реального времени, а на верхнем — операционной системы общего назначения.

Верхний уровень содержит сетевой сервер, имеющий выход в Internet, кластер, реализующий модели опорно-поворотного устройства РТ [3] и конечно-элементные вычисления параметров зеркальной системы, кластер для вычисления параметров электромагнитного поля в зоне приема и кластер для восстановления изображений космических источников радиоизлучения

и их экспертных оценок для определения поправок на управление.

Средний уровень содержит групповой регулятор подвижных щитов с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор основного зеркала с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор контррефлектора с программным блоком и блоком коррекции, групповой регулятор адаптивной платформы облучателя (АПО) [4] с программным блоком, блоком коррекции и блоком формирования сигналов сканирования, а также 3 измерительно-вычислительных комплекса (ИВК):

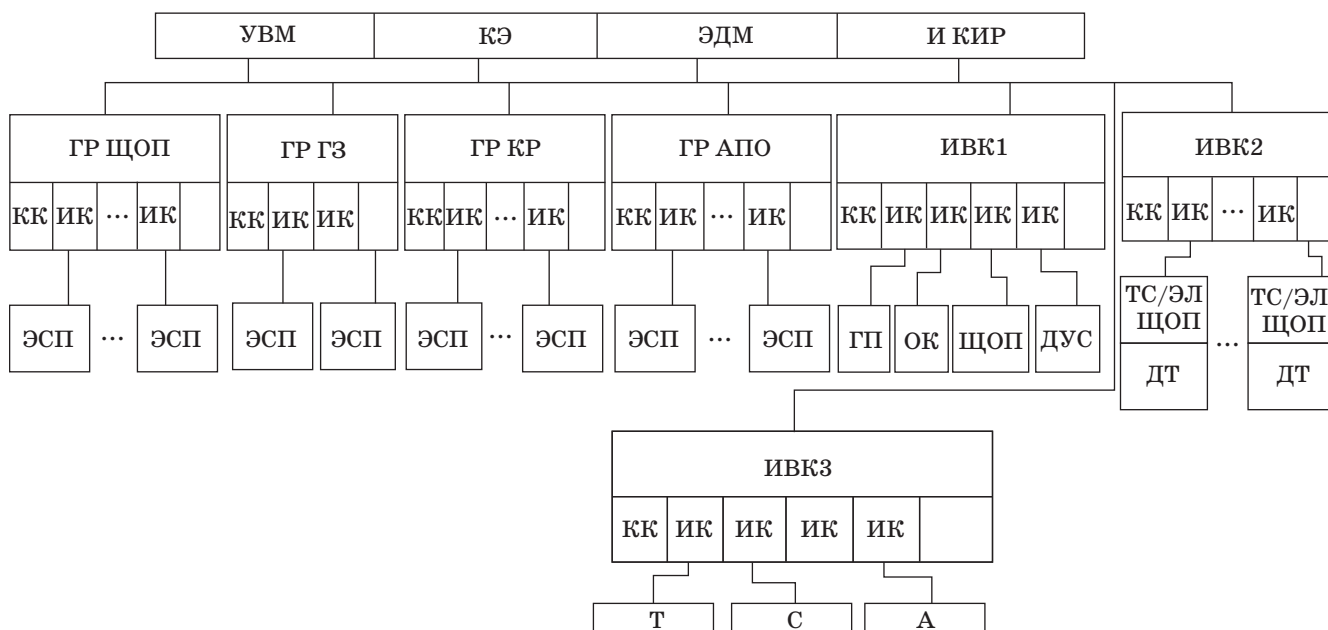
- ИВК1 содержит измерительные каналы опорного кольца, щитов отражающей поверхности ГЗ, датчиков угловых скоростей и гироскопической платформы;
- ИВК2 содержит 10 измерительных каналов телевизионной системы, совмещенной с управлением электроприводами щитов отражающей поверхности, а также датчики контроля температуры, установленные на щитах;
- ИВК3 содержит измерительные каналы юстировочной системы, сейсмографа, термогигробарометра и анеморумбографа.

Нижний уровень содержит контроллеры электросиловых приводов актуаторов подвижных щитов, угла места и азимута ГЗ, перемещения КР и перемещения АПО с соответствующими датчиками обратной связи, а также контроллеры измерительных каналов ИВК. Обобщенная структура системы управления (рис. 1) включает: УВМ — управляющую вычислительную машину с выходом в Internet; КЭ — кластер для

конечно-элементного вычисления параметров зеркальной системы РТ; ЭДМ — кластер для вычисления параметров электромагнитного поля в зоне приема; И КИР — кластер для восстановления изображений космических источников радиоизлучения и их экспертных оценок для определения поправок на управление; ГР ЩОП — групповой регулятор щитов отражающей поверхности, управляет электроприводами щитов, включает коррекцию; ГР ГЗ — групповой регулятор главного зеркала, задает углы места и азимута положения главного зеркала, включая коррекцию; ГР КР — групповой регулятор контррефлектора; ГР АПО — групповой регулятор адаптивной платформы облучателя, имеющий структуру, аналогичную ГР КР [2]; ИВК1–3 — информационно-вычислительные комплексы; ГП решает логическую задачу в определении последовательности управления щитами; КК — контроллеры каналов; ИК — измерительные каналы; ЭСП — электросиловые приводы; ДТ — датчики температуры.

Основными режимами работы системы автоматического наведения РТ на космический источник радиоизлучения являются:

- запись весовых поправок;
- обучение экспертной системы по сигналам от известных мощных КИР;
- калибровка или запись шума вблизи исследуемого КИР;
- наведение на исследуемый КИР;
- слежение за исследуемым КИР;
- сканирование в зоне исследуемого КИР;
- поиск неизвестных КИР в заданной зоне;



■ Рис. 1. Обобщенная структура системы управления

— приведение основного зеркала в заштыривание.

Таким образом, система управления РТ на аппаратном уровне содержит разнородное (управляющее, измерительное, сетевое, информационное и др.) оборудование с разными интерфейсами и должна обеспечивать решение сложных измерительных, вычислительных и логических задач, связанных с управлением и адаптацией зеркальной системы данного РТ.

Архитектура локальной вычислительной сети

Опыт создания подобных систем управления [1, 4] показывает, что для обеспечения рассмотренных режимов работы системы управления РТ миллиметрового диапазона необходимо обеспечить параллельную работу различных управляющих вычислительных подсистем в режиме реального времени. Поэтому при выборе архитектуры ЛВС данной системы необходимо учитывать следующие общие требования:

- высокое быстродействие и синхронизация вычислений и обменов информацией между подсистемами;
- адаптируемость — обеспечение возможности к расширению и модификации локальной сети без глобального изменения состава и архитектуры аппаратно-программных средств;

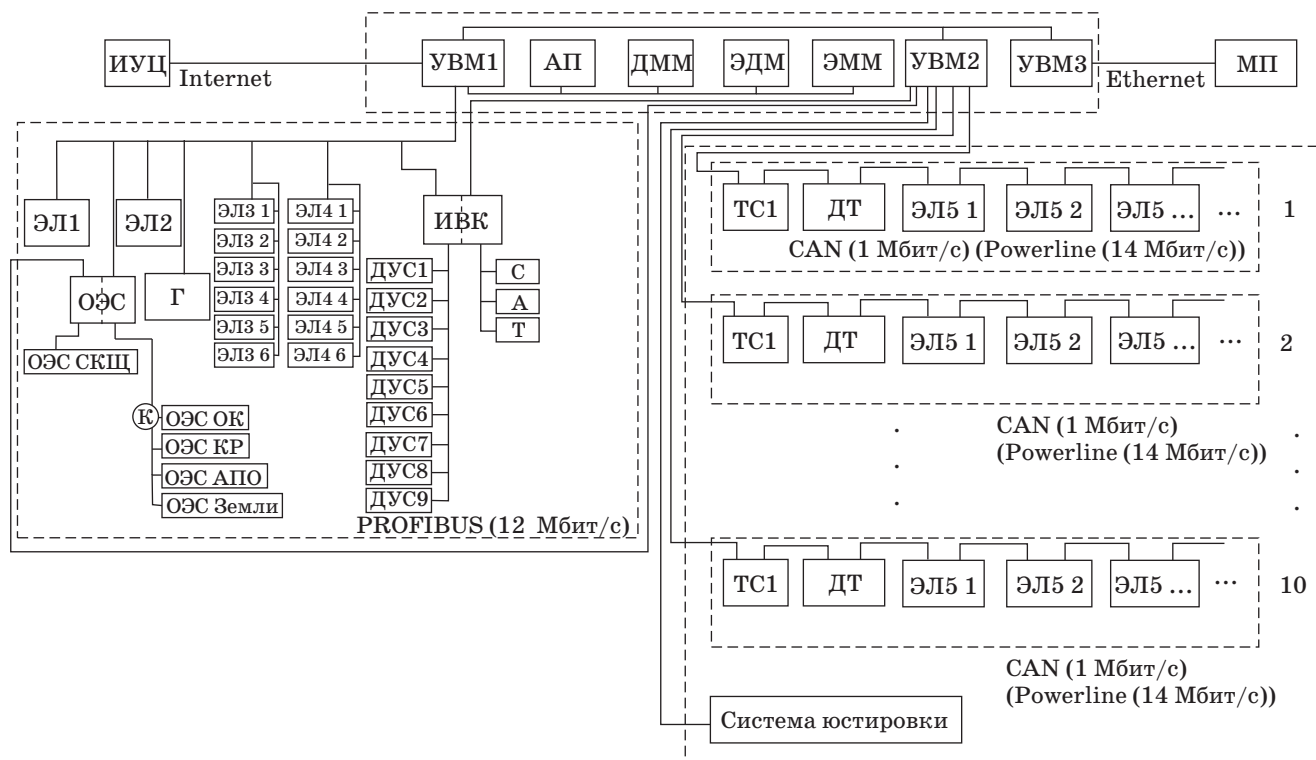
• надежность — свойство локальной сети сохранять полную или частичную работоспособность вне зависимости от выхода из строя некоторых узлов или конечного оборудования.

Анализ режимов управления РТ миллиметрового диапазона [2] показывает, что их ЛВС можно разбить на две связанные между собой на верхнем уровне части (подсети), имеющие различные временные циклы обмена информацией.

В первую подсеть входят ИВК1 и датчики угловых скоростей. Основываясь на требованиях для наиболее быстродействующего привода АПО, который должен обрабатывать воздействия с частотами 2,5 и 5 Гц, можно провести расчет необходимой скорости для этой подсети и выбрать нужный интерфейс.

Подсеть должна работать с задержкой не более 10 % от частоты колебаний АПО, что равно 0,02 с. Самое большое количество информации будет проходить по каналу обмена сооптико-электронной системой (ОЭС) и равняться $6 \times 16 \times 3 + 2 \times 16 = 320$ битам (с трех устройств поступает по 6 координат с разрядностью 16 + 2 координаты с Земли). Следовательно, будет передаваться 320 бит в 0,02 с, что равно 16 000 бит/с или 2000 Б/с. Подходящий интерфейс — PROFIBUS.

Вторая подсеть включает в себя ИВК2 и остальные датчики из ИВК3. Для уменьшения нагрузки данную подсеть целесообразно разделить на 10 секторов, каждый из которых включает в себя



■ Рис. 2. Архитектура локальной вычислительной сети

160 актуаторов и 20 телевизионных систем. Выбор интерфейса для этой подсети основывается на 8-минутном цикле, это значит, что сеть должна обеспечить передачу информации за 0,8 мин. Итак, количество точек на каждом секторе — 180, разрядность слов данных — 8, следовательно, объем информации равен $8 \times 20 \times 3 + 160 \times 8 = 1760$ бит или 220 Б. В итоге, обязательное условие сети — обеспечить передачу 220 Б за 7,5 с, что равно 30 Б/с. Для этой задачи можно использовать интерфейс CAN, однако, для уменьшения количества проводов также можно рассмотреть вариант PowerLine. Технология PowerLine позволяет использовать одни и те же провода для передачи как информации, так и питания, при этом следует избегать высокого напряжения или большого количества одновременных активных подключений, так как это может вызвать помехи в радиоканале.

Итак, для ЛВС РТ вполне подходят следующие сетевые интерфейсы:

- PowerLine — скорость передачи данных до 12 Мбит/с (делится на количество объектов), обеспечивает связь по электропроводке;
- PROFIBUS — скорость обмена прямо зависит от длины сети и варьируется от 100 Кбит/с на расстоянии 1200 м до 12 Мбит/с на дистанции до 100 м;
- CAN — максимальная скорость передачи данных составляет 1 Мбит/с при длине сети 40 м и около 40 Кбит/с при длине сети 1000 м;
- Ethernet.

В соответствии с вычислениями архитектура ЛВС радиотелескопа строится по типу «толстое дерево» (рис. 2), где: ЭЛ1 — электропривод азимута; ЭЛ2 — электропривод угла места; ЭЛ3 — электропривод АПО; ЭЛ4 — электропривод контррефлектора; ЭЛ5 — электропривод щитов главного зеркала; ОЭС — оптико-электронная система; Г — гироскоп; ТС — телевизионная система; ИУЦ — информационно-управляющий центр; УВМ1–3 — управляющие вычислительные машины; ЭДМ — электродинамическая модель; ЭММ — электромагнитная модель; АП — аппроксимирующий параболоид; ДММ — динамическая модель механики; ОК — опорное кольцо; ДУС — датчик угловых скоростей; С — сейсмограф; Т — термогигробарометр; А — анеморумбограф; СКЩ — система контроля щитов; МП — матричный приемник; ДТ — датчик температуры (по 4 на каждый сектор ГЗ).

Особенности построения программного обеспечения

Программное обеспечение подобных сложных систем управления обычно имеет следующую иерархическую структуру.

На нижнем уровне располагается системное программное обеспечение, в роли которого выступает операционная система реального времени, например QNX, либо другая UNIX-подобная система. Далее идет API (интерфейс программирования приложений), представляющий собой набор функций, позволяющих связать операционную систему с прикладным программным обеспечением (ППО), верхним уровнем которого являются:

- управляющие программы;
- прогнозирующие модели;
- статистическая обработка;
- графические интерфейсы;
- экспертные системы.

Очевидно, что при использовании UNIX и, следовательно, API этой операционной системы все ППО строится по принципу объектно-ориентированного программирования и представляет собой программные модули, подключаемые к ядру операционной системы. Для создания ППО целесообразно использовать программные средства выбранной системы, в данном случае, например, возможности языка C++. Использование UNIX-систем или иных систем реального времени подразумевает параллельные вычисления для существенного повышения быстродействия исполняемых программ путем распределения задач на разные вычислительные устройства.

Рассмотрим подробнее методы и средства параллельных вычислений.

Параллельные вычисления существуют в нескольких формах: параллелизм на уровне битов, параллелизм на уровне инструкций, параллелизм данных, параллелизм задач.

Классификация параллельных архитектур по Флинну (M. Flynn):

- вычислительная система с одним потоком команд и данных (однопроцессорная ЭВМ — SISD, Single Instruction stream over a Single Data stream);
- вычислительная система с общим потоком команд (SIMD, Single Instruction, Multiple Data — одиночный поток команд и множественный поток данных);
- вычислительная система со множественным потоком команд и одиночным потоком данных (MISD, Multiple Instruction Single Data — конвейерная ЭВМ);
- вычислительная система со множественным потоком команд и данных (MIMD, Multiple Instruction Multiple Data).

Типичными представителями SIMD являются векторные архитектуры. К классу MISD ряд исследователей относит конвейерные ЭВМ, однако это не нашло окончательного признания, поэтому можно считать, что реальных систем — представителей данного класса не существует. Класс

MIMD включает в себя многопроцессорные системы, где процессоры обрабатывают множественные потоки данных. Отношение конкретных машин к конкретному классу сильно зависит от точки зрения исследователя. Так, конвейерные машины могут быть отнесены и к классу SISD (конвейер — единый процессор), и к классу SIMD (векторный поток данных с конвейерным процессором), и к классу MISD (множество процессоров конвейера обрабатывают один поток данных последовательно), и к классу MIMD — как выполнение последовательности различных команд (операций ступеней конвейера) над множественным скалярным потоком данных (вектором).

Наиболее распространенными из систем класса SIMD являются матричные системы, которые лучше всего приспособлены для решения задач, характеризующихся параллелизмом независимых объектов или данных. Организация систем подобного типа, на первый взгляд, достаточно проста. Они имеют общее управляющее устройство, генерирующее поток команд, и большое число процессорных элементов, работающих параллельно и обрабатывающих каждый свой поток данных. Таким образом, производительность системы оказывается равной сумме производительностей всех процессорных элементов. Однако на практике, чтобы обеспечить достаточную эффективность системы при решении широкого круга задач, необходимо организовать связи между процессорными элементами с тем, чтобы наиболее полно загрузить их работой. Именно характер связей между процессорными элементами и определяет разные свойства системы.

Матричные процессоры наилучшим образом ориентированы на реализацию алгоритмов обработки упорядоченных (имеющих регулярную структуру) массивов входных данных. К настоящему времени в их программировании достигнута высокая степень гибкости. Зачастую матричные процессоры используются в качестве вспомогательных процессоров, подключенных к главной универсальной ЭВМ.

Следует помнить, что применение одной операционной системы не накладывает жестких рамок по требованию к методам программирования, многие языки программирования являются кроссплатформенными, также различное ППО может быть написано на разных языках и даже платформах и технологиях, но должно общаться с нужными модулями, используя метод «запрос-ответ». Говоря о различных технологиях, в первую очередь подразумевают нейронные сети.

В отличие от цифровых систем, представляющих собой комбинации процессорных и запоминающих блоков, нейропроцессоры содержат память, распределенную в связях между очень про-

стыми процессорами, которые часто могут быть описаны как формальные нейроны или блоки из однотипных формальных нейронов. Тем самым основная нагрузка на выполнение конкретных функций процессорами ложится на архитектуру системы, детали которой в свою очередь определяются межнейронными связями. Подход, основанный на представлении как памяти данных, так и алгоритмов системой связей (и их весами), называется коннекционизмом.

Три основных преимущества нейрокомпьютеров:

1) все алгоритмы нейроинформатики высокопараллельны, а это уже залог высокого быстродействия;

2) нейросистемы можно легко сделать очень устойчивыми к помехам и разрушениям;

3) устойчивые и надежные нейросистемы могут создаваться и из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров.

В настоящее время использование нейросетей позволяет в некоторых случаях добиться лучшей производительности, чем при использовании традиционных систем вычислений.

Итоговым критерием в выборе методов и средств построения ППО для обеспечения работы и эксплуатации большого РТ является количество фирм, занятых в проекте, каждая из которых применяет свои, зачастую разные, методы и технологии.

По этой же причине само ППО разделено на несколько частей, из которых опишем основные.

Управляющие программы, задачами которых являются:

— задания программных движений с интерполяторами;

— вычисления ошибок и коррекций;

— формирование законов управления.

От качества данного ППО напрямую зависят скорость и точность работы всего телескопа, для повышения производительности можно использовать нейросети, однако, в данном случае быстрое действие не должно идти в ущерб качеству, — ошибка или неточность, допущенная в написании управляющей программы, может сказаться на верности результатов измерений.

Также необходимым ППО является *прогнозирующая модель*, которая отслеживает состояние динамического объекта, осуществляя прогноз на время принятия решения, что позволяет компенсировать временное запаздывание, которое могло бы привести к снижению точности наведения. В данном модуле лучше всего использовать нейросеть, так как описать все возможные изменения в динамике КИР традиционными алгоритмами сложно.

Еще одно немаловажное ППО — *графический интерфейс*, предоставляющий всю полезную информацию в понятном для пользователя виде. На

данный момент практически любой язык программирования в системе Unix имеет широкие графические возможности, этот модуль является наиболее простым с точки зрения программирования и отладки, и использование нейросетей здесь не обязательно. Однако следует правильно подобрать палитру цветов и способ графического вывода изображений, поскольку требуется адекватная передача естественных цветов, превращающих численные характеристики интенсивности (яркости) в осмысленные изображения звездного неба.

Экспертная система — ППО, которое обеспечивает возможность инициализации тех программно реализованных алгоритмов управления или распознавания, выбор которых в той или иной ситуации представляется наиболее оправданным. Важнейшим среди множества принципиальных вопросов построения экспертной системы является определение объема выполняемых функций, синтез архитектуры построения, формирование базы алгоритмов и соответствующей базы знаний, конструирование машины логического вывода, обеспечивающей режим реального времени. Как и в случае с прогнозирующей моделью, лучшим выбором для основы данного ППО является нейросеть.

И в заключение — ППО *статистической обработки*, которое обеспечивает сбор, хранение и выдачу нужных данных. Модуль представляет собой практически базу данных, использование нейросети не требуется. В целях сжатия поступающих данных и разгрузки сети и устройств хранения информации возможно использование алгоритмов сжатия. Например, для уменьшения нагрузки на сеть при скоростях передачи менее 64 Кбит/с можно использовать алгоритм Ван Якобсона (RFC-1144). При этом достижимо повышение пропускной способности на 50 % для скорости передачи 4800 бит/с. Сжатие заголовков зависит от типа протокола. При передаче больших пакетов на сверхвысоких скоростях по региональным сетям используются специальные канальные алгоритмы, не зависящие от рабочих протоколов.

Следует упомянуть, что сжатие на программном уровне влечет за собой потерю производительности отдельных систем, поэтому его можно использовать только при сильной загрузке сетевого канала. В связи с этим для сжатия информа-

ции целесообразно применять аппаратные средства, которые должны располагаться как со стороны передатчика, так и со стороны приемника. Такие устройства дают хорошие коэффициенты сжатия и приемлемые задержки.

Заключение

Системы управления большими РТ целесообразно строить в виде управляющей компьютерной сети, решающей задачу распределенного сетевого (децентрализованного) управления сложным техническим комплексом типа радиотелескопа РТ-70.

Для обеспечения всех режимов работы системы управления подобного РТ миллиметрового диапазона необходимо обеспечивать параллельную работу различных управляющих вычислительных подсистем в режиме реального времени, а также осуществлять моделирование динамики зеркальной системы и распределения электромагнитного поля в плоскости приемника излучения с использованием нейросетевой технологии.

Программное обеспечение для обработки измерительной и диагностической информации должно содержать интеллектуальные компоненты в виде экспертных подсистем.

Литература

1. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона с адаптивной зеркальной системой // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 14–19.
2. Система автоматического наведения радиотелескопа / Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. и др., патент на изобретение (заявка № 2006125897) ФИПС от 03 июля 2007.
3. Дубаренко В. В., Коновалов А. С., Кучмин А. Ю. Математические модели механических систем как объектов управления: учеб. пособие / ГУАП. СПб., 2007. — 188 с.
4. Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Адаптивная платформа облучателя // Завалишинские чтения'07 / ГУАП. СПб., 2007. — С. 87–92.