

УДК 621.396.967
DOI: 10.15827/0236-235X.135.448-456

Дата подачи статьи: 27.01.21
2021. Т. 34. № 3. С. 448–456

Модели анализа и прогноза загруженности вычислительных и энергетических ресурсов радиолокационной станции

А.А. Непряев¹, главный специалист, nepryaev@cps.tver.ru
А.Н. Шпигарь¹, зав. лабораторией, spigar@cps.tver.ru

¹ НИИ «Центрпрограммсистем», г. Тверь, 170024, Россия

В статье предложен метод решения проблемы распределения вычислительных и энергетических ресурсов многофункциональной многоканальной радиолокационной станции с активной фазированной антенной решеткой.

Метод основан на применении авторской когнитивной системы управления ресурсами радара, которая в реальном времени планирует свои действия исходя из анализа внешней обстановки и своего внутреннего состояния. Ключевым компонентом когнитивной системы управления является радарный планировщик, реализованный на основе дополненного алгоритма планировщика Ормана, учитывающего наличие временных, энергетических и вычислительных ресурсов и обеспечивающего оптимальное распределение конечных ресурсов радара.

Для решения задачи анализа и прогноза распределения энергетических ресурсов создана термическая модель приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки, для вычислительных ресурсов – модель тракта обработки первичной радиолокационной информации. Термическая модель приемопередающего модуля предназначена для моделирования тепловых процессов, происходящих как во время излучения зондирующего сигнала, так и в паузах между ними. Модель тракта обработки осуществляет расчет времени, необходимого автоматизированной системе для обработки входящей радиолокационной информации, и позволяет спрогнозировать уровень загрузки вычислительных ресурсов при планировании режимов работы радара.

Целью статьи является демонстрация результатов моделирования работы радарного планировщика, показывающих, как с помощью разработанных моделей можно осуществлять анализ и прогноз наличия временных и энергетических ресурсов, а также перераспределять их между задачами радара. Показано, как при формировании временной диаграммы радарным планировщиком исполнения заданий выполняется размещение элементов временных связей заданий на конвейере временных дискретов с одно-временным учетом вычислительных и энергетических ресурсов.

Ключевые слова: радиолокационная станция, многофункциональный радар, распределение ресурсов.

Многофункциональная многоканальная радиолокационная станция (МРЛС) с активной фазированной антенной решеткой (АФАР), оснащенная электронно-управляемым сканирующим лучом и цифровой обработкой информации, способна в реальном масштабе времени обеспечивать непрерывный обзор пространства, обнаружение, распознавание, наведение и сопровождение целей с высоким темпом обновления информации. Однако, помимо указанных преимуществ, существует ряд проблем, связанных с оптимальным распределением конечных ресурсов, таких как временные, энергетические и вычислительные. Управление ресурсами особенно важно в ситуациях перегрузки пропускной способности, когда необходимо принимать решения, какие задачи и по каким целям выполнять в установленных вре-

менных ограничениях, а какие можно поставить в очередь либо сбросить.

Для оптимизации процесса управления распределением и перераспределением ограниченных временных, энергетических и вычислительных ресурсов между различными задачами предлагается использовать когнитивную систему управления МРЛС с АФАР [1]. Такая система, функционируя в цикле восприятия–действия, способна автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и планировать работу на более длительные периоды времени.

Центральную роль в управлении ресурсами играет многофункциональный радиолокационный планировщик [2], обеспечивающий эффективное планирование последовательностей измерений (излучение–прием), которые

должны быть выполнены при условии соблюдения требований, предъявляемых к производительности МРЛС, и набора заданных ограничений, таких как сроки выполнения и доступные ресурсы. Однако алгоритмы работы планировщиков, представленные в [3, 4], предполагают, что принятие решений о распределении ресурсов должно опираться на относительные приоритеты задач МРЛС и временные ресурсы, но без учета энергетических и вычислительных. Такой подход не является оптимальным с точки зрения распределения ресурсов и времени планирования заданий.

Для устранения этих недостатков разработана архитектура когнитивной системы управления ресурсами на основе дополненного алгоритма планировщика Ормана [5] и показана реализация модулей анализа и прогноза загруженности энергетических и вычислительных ресурсов, обеспечивающих планирование задания с учетом температуры *приемопередающих модулей* (ППМ) и наличия вычислительных ресурсов для обработки входящей *радиолокационной информации* (РЛИ).

Конвейер временных дискрет

Работа планировщика заданий основана на использовании многоуровневых очередей заданий с обратной связью. Задания от модулей, отвечающих за обзор пространства, двухэтапное обнаружение и сопровождение целей, формируют отдельные приоритетные очереди в порядке убывания приоритетов. Из сформированных приоритетных очередей заданий формируются заявки на обслуживание, включающие последовательный процесс задания временных интервалов для излучения зондирующих сигналов, интервалов приема отраженных сигналов, обработки входящей РЛИ и служебных интервалов работы аппаратуры МРЛС [6]. Работа планировщика выполняется периодически в рамках дискретного интервала планирования, при этом осуществляется размещение элементов временной связки каждого задания на *конвейере временных дискрет* (КВД). Элементы временной связки формируют замкнутый временной цикл работы МРЛС, состоящий из формирования зондирующего сигнала, времени ожидания, приема и обработки отраженных сигналов. При этом задача оптимизации процесса управления распределением и перераспределением ограниченных временных, энергетических и вычислительных ресурсов между различными задачами

приводит к необходимости вложения элементов временной связки друг в друга.

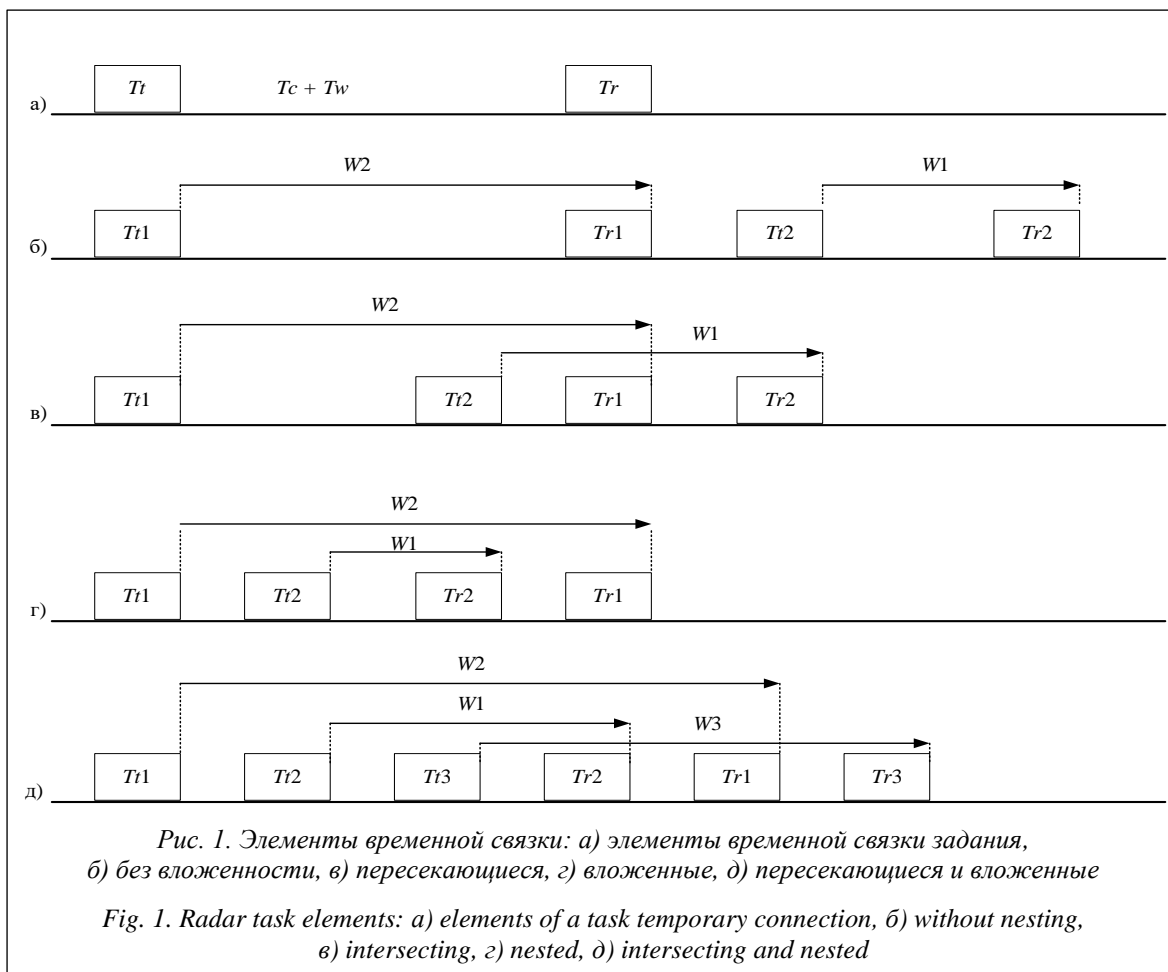
Планирование заданий радара

Для формирования временной диаграммы работы радарный планировщик размещает элементы временной связки каждого задания на конвейере временных дискретов. Каждое задание содержит элементы временной связки, которые, в свою очередь, состоят из времени передачи (Tt), времени охлаждения и ожидания ($Tw + Tc$), времени приема (Tr) (рис. 1а). Длительности Tt и Tr не являются вытесняющими, поскольку рассматривается случай, когда радар работает только на передачу или прием для одной задачи. Однако Tw одной задачи может перекрываться Tr или Tw другой, так как радар может остывать во время ожидания и приема. Бездействие в течение всего времени ожидания Tw (от конца передачи до начала приема) не позволяет эффективно использовать ресурсы радара и снижает возможность планирования системы. Таким образом, встает задача обеспечения оптимального вложенного чередования элементов временной связки заданий. Для ее решения используются алгоритмы планирования на основе шаблонов [7–9] и адаптивного планирования [10], причем последний наиболее эффективен [11].

В алгоритмах планирования [12–14] учитываются только временные и энергетические ограничения без учета вычислительных. Далее будут описаны разработанные модели и продемонстрированы результаты моделирования распределения энергетических и вычислительных ресурсов для различных вариантов вложенности элементов временной связки (рис. 1б–д).

Энергетические ресурсы

Тепловой режим ППМ. При проектировании АФАР решается широкий спектр конструкторско-технических задач, в частности, проектирование излучающего полотна, формирование и контроль характеристик ППМ с учетом эксплуатационных требований [15]. В силу высокой плотности упаковки электронных компонентов ППМ актуальной проблемой является обеспечение теплового режима в процессе эксплуатации. Решить ее можно путем как интенсификации процесса теплопередачи и теплоотдачи, рассеиваемой в активном элементе приемопередающего модуля тепловой



мощности [16, 17], так и обеспечения контроля температуры и автоматического отключения ППМ в случае превышения максимально допустимого значения температуры [18].

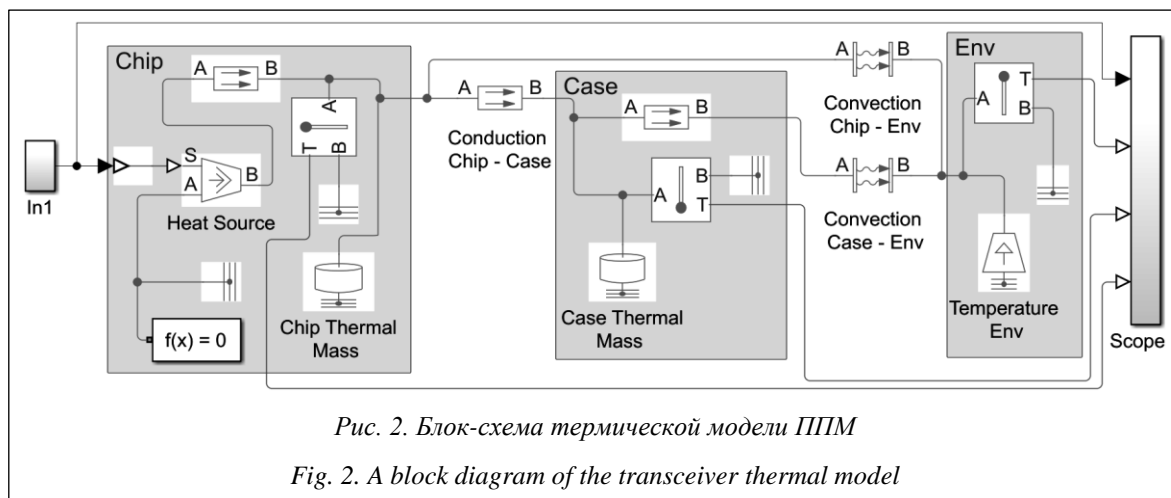
Разработка модели для оценки тепловых режимов ППМ АФАР – сложная задача, зависящая от многих аспектов: конфигурации тепловыделяющих устройств, основными из которых являются *выходные усилители мощности* (ВУМ), а вторичными – *выходные источники питания* (ВИП), типа охлаждения, размещения ППМ и их каналов охлаждения и т.д. [19, 20]. Поэтому в данной работе для демонстрации решения задачи анализа и прогноза распределения энергетических ресурсов создана упрощенная термическая модель ППМ АФАР, в которой для тепловыделяющего устройства проводится расчет процессов нагрева и теплоотвода на корпус модуля и в окружающую воздушную среду [21].

Термическая модель. Для моделирования процессов теплопередачи ППМ АФАР использована среда графического программирования Simulink на основе MATLAB. На рисунке 2

приведена блок-схема термической модели ППМ АФАР. Модель состоит из следующих компонентов: вход In1, на который поступают логические сигналы 0 и 1, определяющие длительность работы модуля в режиме передачи или приема; Chip – тепловыделяющее устройство, источник тепловой энергии, осуществляет процесс теплопередачи теплопроводностью на корпус ППМ и естественной конвекцией; Case – корпус ППМ, радиатор осуществляет естественную конвекцию; Env – свободное пространство (воздушная среда); Score – отображает сигналы, сгенерированные в процессе моделирования.

Количество теплоты, которое получают и теряют при теплопередаче компоненты схемы Chip Thermal Mass и Case Thermal Mass, описывается уравнением $Q = cm \frac{dT}{dt}$, где Q – количество теплоты; c – удельная теплоемкость; m – масса; T – температура; t – время.

Компонент схемы Conduction Chip–Case осуществляет процесс теплопередачи теплопроводностью для плоской стенки [22] и опи-



сывается уравнением $Q = k \frac{A}{D}(T_A - T_B)$, где Q – количество теплоты; k – теплоемкость материала; A – площадь стенки, перпендикулярная направлению теплового потока; D – толщина стенки; T_A, T_B – температура на поверхностях стенки.

Компоненты схем Convection Chip–Env и Convection Case–Env осуществляют процесс теплопередачи конвекцией и описываются уравнением $Q = kA(T_A - T_B)$, где Q – количество теплоты; k – коэффициент конвективной теплопередачи; A – площадь поверхности; T_A, T_B – температура поверхности и окружающего воздуха.

Вычислительные ресурсы

Тракт обработки. Модель анализа и прогноза загруженности вычислительных ресурсов позволяет определить время, необходимое на обработку входящей РЛИ, и спрогнозировать ситуации перегрузки, когда данные не могут быть обработаны в рамках заданных временных ограничений. Тракт первичной цифровой обработки РЛИ обеспечивает выполнение таких функций, как аналого-цифровое преобразование выходных приемных сигналов ППМ, предварительная частотная обработка, цифровое адаптивное формирование приемных диаграмм направленности антенны (суммарной и двух

разностных) на основе оптимизации весовых коэффициентов, оценка двухмерного пространственного спектра углового сверхразрешения принятых сигналов, оптимальная фильтровая обработка принятых сигналов суммарного и разностных каналов с последующей порогово-логической обработкой суммарного канала, передача сообщений о результатах обработки в соответствии с протоколом информационного взаимодействия по сети функционального управления (рис. 3).

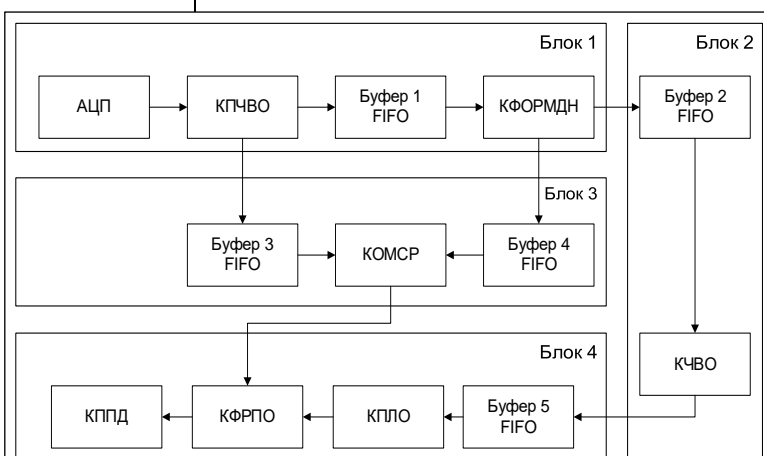


Рис. 3. Блок-схема тракта первичной цифровой обработки РЛИ: АЦП – аналого-цифровое преобразование принятых от ППМ сигналов; КПЧВО – компонент предварительной частотно-временной обработки; КФОРМДН – компонент формирования диаграммы направленности; КЧВО – компонент частотно-временной обработки данных; КПЛО – компонент порогово-логической обработки данных; КОМСП – компонент оценки ковариационной матрицы и сверхразрешения; КФРПО – компонент формирования результатов первичной обработки РЛИ; КППД – компонент приема-передачи данных

Fig. 3. A block diagram of the pipeline for primary radar plot extraction

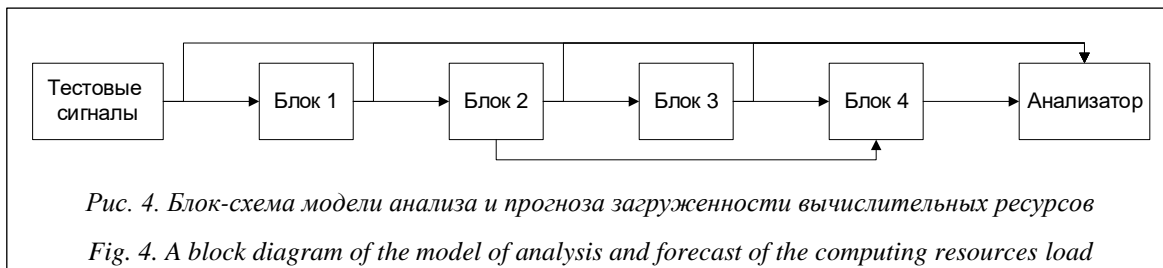


Рис. 4. Блок-схема модели анализа и прогноза загруженности вычислительных ресурсов

Fig. 4. A block diagram of the model of analysis and forecast of the computing resources load

Модель тракта. Для модельно-ориентированного проектирования и моделирования работы тракта обработки первичной РЛИ [23] использовалась среда графического программирования Simulink на основе MATLAB. На рисунке 4 приведена блок-схема вычислительного конвейера [24], за основу которой взят тракт первичной цифровой обработки РЛИ (рис. 3). Модель состоит из следующих блоков:

- блок «тестовые сигналы» выполняет генерацию элементов временной связки заданий;
- блоки 1–4 осуществляют расчет времени вычислений, временной задержки и скорости обмена данными между компонентами тракта;
- Score – отображает сигналы, сгенерированные в процессе моделирования.

Рассмотрим структуру всех блоков на примере блока 1 (рис. 5).

На вход in1 поступают логические сигналы 0 и 1, где длительность логической единицы имитирует время записи данных в буферное

FIFO. Константы Count+ и Count– определяют соотношение размеров записываемых и считываемых данных соответственно. Файл функции pulse_gen реализован на основе конечного автомата и имитирует задержку, необходимую блоку для вычислений. Входные параметры функции определяют время задержки, количество считанных и выданных данных. Выход pulse_out имитирует сигнал времени записи данных в буферное FIFO следующего блока. Выход out служит для отображения уровня загрузки буфера блока. Исходные коды описанных в статье моделей доступны в Bitbucket [25], для работы с ними необходим Mathworks Matlab R2020b.

Результаты моделирования

Представим результаты моделирования нагрева ППМ и уровня загрузки вычислительных ресурсов для вариантов вложенности элемента временной связки, изображенных на рисунке 1 б–д. Покажем наглядно, как с помощью моделирования можно прогнозировать ситуации превышения критической температуры ППМ в режиме передачи и перегрузки пропускной способности тракта обработки РЛИ в режиме приема.

На рисунках 6–9 изображены графики: времени передачи – T_t , времени приема – T_r , температуры ППМ – C , уровня загрузки вычислительных ресурсов при обработке входящей РЛИ – $Comp$. Графики наглядно демонстрируют, что для оптимального планирования заданий радара при различ-

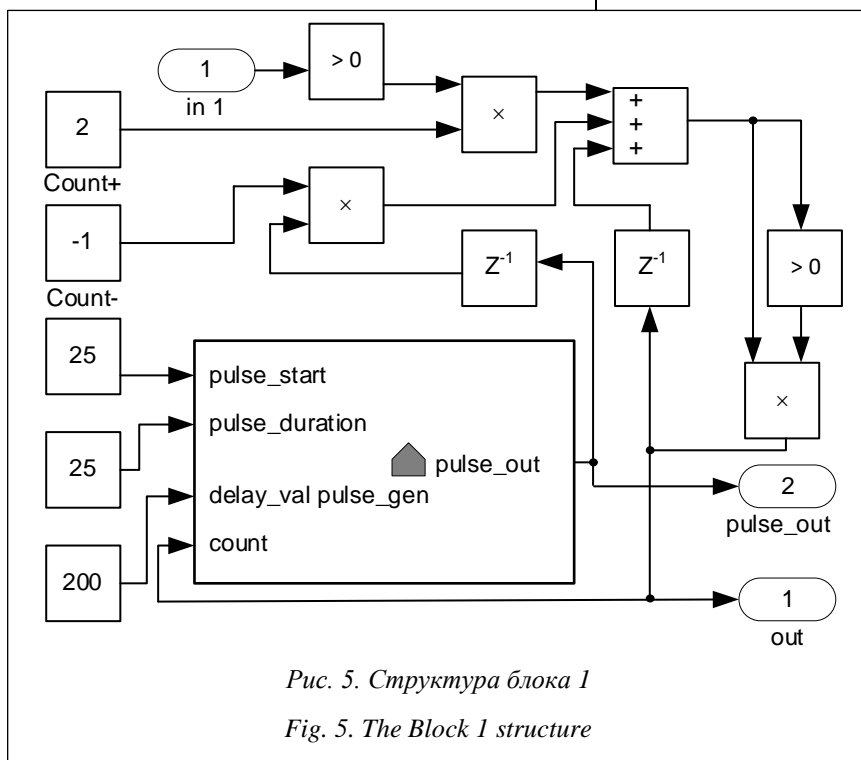


Рис. 5. Структура блока 1

Fig. 5. The Block 1 structure

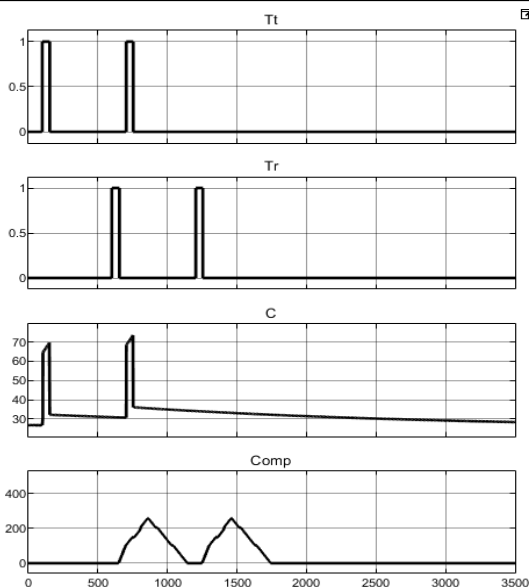


Рис. 6. Распределение ресурсов для случая, отображенного на рисунке 1б

Fig. 6. Resource allocation for the case (Fig. 1б)

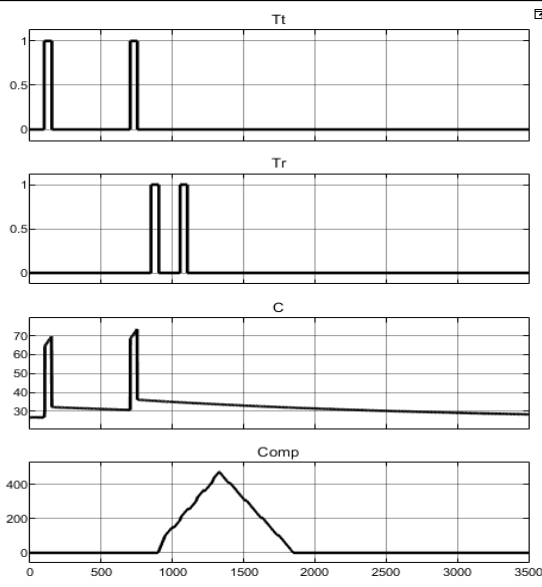


Рис. 7. Распределение ресурсов для случая, отображенного на рисунке 1в

Fig. 7. Resource allocation for the case (Fig. 1в)

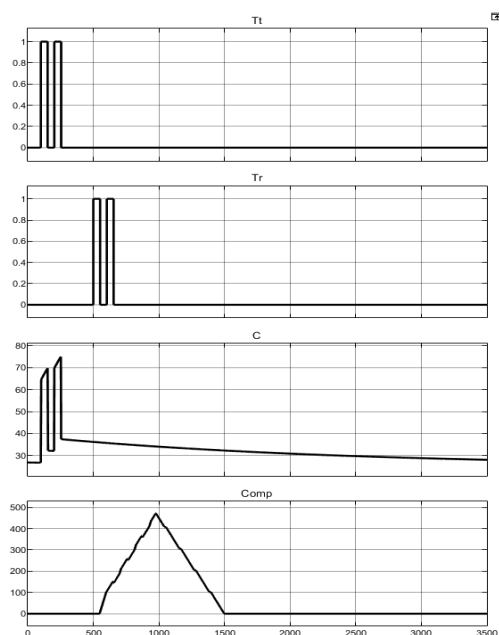


Рис. 8. Распределение ресурсов для случая, отображенного на рисунке 1г

Fig. 8. Resource allocation for the case (Fig. 1г)

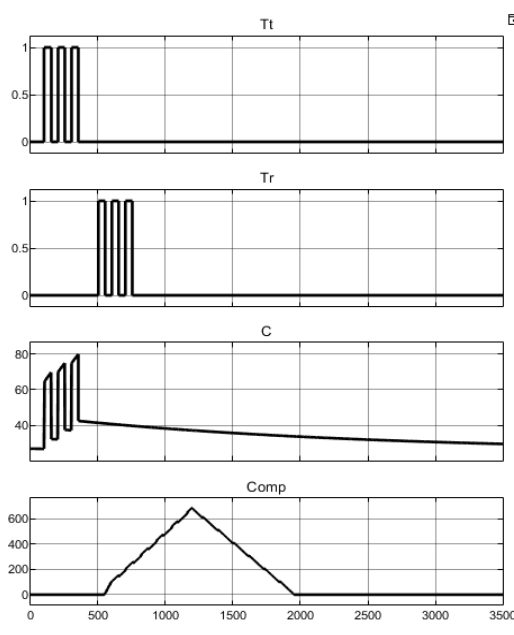


Рис. 9. Распределение ресурсов для случая, отображенного на рисунке 1д

Fig. 9. Resource allocation for the case (Fig. 1д)

ных вариантах вложенности элементов временной связки нужно учитывать не только временной ресурс.

Заключение

На основании результатов моделирования можно сделать вывод об эффективности разра-

ботанных моделей анализа и прогноза распределения ресурсов, так как они позволяют размещать элементы временных связок заданий на конвейере временных дискретов с одновременным учетом вычислительных и энергетических ресурсов. Кроме того, благодаря применению этих модулей повышается качество РЛИ за счет эффективного использования ресурсов МРСЛ.

Литература

1. Непряев А.А., Шпигарь А.Н. Концепция когнитивного радара // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по матер. XXXVI Междунар. науч.-практич. конф. 2020. № 7. С. 4–11.
2. Orman A.J., Potts C.N., Shahani A.K., Moore A.R. Scheduling for a multifunction array radar system. *European Journal of Operational Research*, 1996, vol. 90, pp. 13–25.
3. Sabatini S., Tarantino M. *Multifunction Array Radar – System Design and Analysis*. USA, Massachusetts, Boston, Artech House publ., 1994, 271 p.
4. Butler J.M. *Multi-Function Radar Tracking and Control*. Ph.D. Thesis, UCL, University of London, 1998, pp. 93–95.
5. Непряев А.А. Метод управления многофункциональной радиолокационной станцией с учетом временных, вычислительных и энергетических ресурсов // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXXI Междунар. науч.-практич. конф. 2020. № 9. С. 4–11.
6. Золотарев М.М., Прусаков А.В., Толкачев А.А., Топчиев С.А., Фарбер В.Е. Вопросы создания информационной структуры многофункциональных РЛС с ФАР // *Радиотехника*. 2006. № 4. С. 16–23.
7. Sheng X., Li Q. Template-based genetic algorithm for qos-aware task scheduling in cloud computing. *Proc. Intern. Conf. on Advanced CBD, Chengdu*, 2016, pp. 25–30. DOI: 10.1109/cbd.2016.015.
8. Shih Ch.-S., Gopalakrishnan S., Ganti P., Caccamo M., Sha L. Template-based real-time dwell scheduling with energy constraint. *Proc. The 9th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2003, pp. 19–27. DOI: 10.1109/RTTAS.2003.1203033.
9. Shih Ch.-S., Gopalakrishnan S., Ganti P., Caccamo M., Sha L. Scheduling real-time dwells using tasks with synthetic periods. *Proc. 24th IEEE RTSS*, 2003, pp. 210–219. DOI: 10.1109/REAL.2003.1253268.
10. Tan Q., Cheng T., Li X. Adaptive dwell scheduling based on a novel online pulse interleaving technique for phased array radar. *Proc. ICCAIS*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAIS46528.2019.9074634.
11. Xiaojie G., Wenchao L. Utilization of time resource for the dwell scheduling of the phase array radar. *Proc. RADAR*, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059340.
12. Zhang H., Xie J., Ge J., Shi J., Zhang Z. Hybrid particle swarm optimization algorithm based on entropy theory for solving DAR scheduling problem. *Tsinghua Science and Technology*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 282–290. DOI: 10.26599/TST.2018.9010052.
13. Haowei Z., Junwei X., Zhaojian Z., Binfeng Z. et al. Pulse interleaving scheduling algorithm for digital array radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 67–73. DOI: 10.21629/JSEE.2018.01.07.
14. Lee Ch.-G., Kang P.-S., Shih Ch.-S., Sha L. Radar dwell scheduling considering physical characteristics of phased array antenna. *Proc. Intern. Symposium on System-on-Chip*, 2003, pp. 14–24. DOI: 10.1109/REAL.2003.1253250.
15. Чернова И.В., Годошева А.С. Особенности реализации приемопередающего модуля АФАР // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2018. Т. 12. № 8. С. 27–31.
16. Езопов А.В. Повышение уровня выходной мощности приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток: Автореф. дис. канд. технич. наук. Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2011. 20 с.
17. Туркичева С.В. Разработка и конструирование четырехканального приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки // XIV Молодеж. науч.-технич. конф. Радиолокация и связь – перспективные технологии: сб. тр. 2016. С. 46–48.
18. Аболдуев И.М., Борисов О.В., Герасимов А.О., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М., Осиповский А.А. и др. Антенные модули для АФАР X-диапазона // *Наноиндустрия*. 2018. Вып. 9. С. 505–510. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.505.510.
19. Бабайцев А.В., Венценосцев Д.Л., Рабинский Л.Н., Радченко В.П. Оценка тепловых режимов приемопередающего модуля активной фазированной антенной решетки // *Изв. ТулГУ. Технические науки*. 2017. № 9. С. 365–374.
20. Zhang W., Wu Q., Zhao S. Thermal design of T/R modules in airborne phased array antenna. *Advances in Computer Science Research*, 2017, vol. 62, pp. 415–418. DOI: 10.2991/jimec-17.2017.91.
21. MathWorks. Support. Documentation. Thermal Models. URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/simscap/thermal-models.html?s_tid=CRUX_lftnav (дата обращения: 10.01.2021).
22. Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1977. 343 с.
23. Кашин В.А., Кузин А.А., Рындык А.Г. Конвейерная обработка радиолокационных сигналов // *Цифровая обработка сигналов*. 2009. № 2. С. 47–51.

24. Radartutorial.eu. Radar Signal Processor. URL: <https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp05.en.html> (дата обращения: 10.01.2021).

25. Bitbucket. 2_Radar_Models. URL: https://bitbucket.org/2ModelRadar/2_radar_models/src/master/ (дата обращения: 10.01.2021).

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.135.448-456

Received 27.01.21
2021, vol. 34, no. 3, pp. 448–456

The models of analyzing and forecasting load of radar station computing and power resources

A.A. Nepryaev¹, Chief Specialist, nepryaev@cps.tver.ru

A.N. Shpigar¹, Head of Laboratory, spehar@cps.tver.ru

¹R&D Institute Centerprogramsistem, Tver, 170024, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a method for solving the problem of distribution of computing and power resources of a multifunctional multichannel radar station with an active phased antenna array.

This method is based on using a cognitive radar resource management system that plans its real-time actions based on analyzing an external situation and an internal state. The main component of the cognitive control system is a radar scheduler based on Orman's algorithm, which takes into account available time, power and computing resources and provides an optimal distribution of the radar final resources.

To solve the problem of analyzing and forecasting the distribution of power resources, there is a transceiver module thermal model; for computing resources, there is a model of the primary radar plot extraction. The transceiver module thermal model is designed to simulate thermal processes occurring during the sounding signal emission and in pauses. The processing pipeline model calculates the time required for the automated system to process the received radar information. It allows forecasting the load level of computing resources when planning the radar operation modes.

The purpose of the paper is to demonstrate the results of modeling a radar scheduler showing how it is possible to analyze and forecast the available time and power resources using the developed models, as well as how to redistribute them between radar tasks. It is shown how the radar scheduler generates a time diagram and places items of temporary task bundles on the timing pipeline taking into account computing and energy resources.

Keywords: phased array radar; multifunction radar; resource allocation.

References

1. Nepryaev A.A., Shpigar A.N. The concept of cognitive radar. *Proc. XXXVI Intern. Sci.-Pract. Conf. Nauchny Forum: Technical and Physical and Mathematical Sciences*, 2020, no. 7, pp. 4–11 (in Russ.).
2. Orman A.J., Potts C.N., Shahani A.K., Moore A.R. Scheduling for a multifunction array radar system. *European Journal of Operational Research*, 1996, vol. 90, pp. 13–25.
3. Sabatini S., Tarantino M. *Multifunction Array Radar – System Design and Analysis*. USA, Massachusetts, Boston, Artech House publ., 1994, 271 p.
4. Butler J.M. Multi-function radar tracking and control. *Ph.D. Thesis*, UCL, University of London, 1998, pp. 93–95.
5. Nepryaev A.A. Multifunction radar control with monitoring of time, computational and energy resources. *Proc. XXXI Intern. Sci.-Pract. Conf. The Problems of Technical and Physical and Mathematical Sciences in Light of Modern Research*, 2020, no. 9, pp. 4–11 (in Russ.).
6. Zolotarev M.M., Prusakov A.V., Tolkachev A.A., Topchiev S.A., Farber V.E. Software facilities of multifunctional radars with PAA. *Radioengineering*, 2006, no. 4, pp. 16–23 (in Russ.).
7. Sheng X., Li Q. Template-based genetic algorithm for qos-aware task scheduling in cloud computing. *Proc. Intern. Conf. on Advanced CBD*, Chengdu, 2016, pp. 25–30. DOI: 10.1109/cbd.2016.015.
8. Shih Ch.-S., Gopalakrishnan S., Ganti P., Caccamo M., Sha L. Template-based real-time dwell sched-

uling with energy constraint. *Proc. The 9th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2003, pp. 19–27. DOI: 10.1109/RTTAS.2003.1203033.

9. Shih Ch.-S., Gopalakrishnan S., Ganti P., Caccamo M., Sha L. Scheduling real-time dwells using tasks with synthetic periods. *Proc. 24th IEEE RTSS*, 2003, pp. 210–219. DOI: 10.1109/REAL.2003.1253268.

10. Tan Q., Cheng T., Li X. Adaptive dwell scheduling based on a novel online pulse interleaving technique for phased array radar. *Proc. ICCAIS*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAIS46528.2019.9074634.

11. Xiaojie G., Wenchao L. Utilization of time resource for the dwell scheduling of the phase array radar. *Proc. RADAR*, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059340.

12. Zhang H., Xie J., Ge J., Shi J., Zhang Z. Hybrid particle swarm optimization algorithm based on entropy theory for solving DAR scheduling problem. *Tsinghua Science and Technology*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 282–290. DOI: 10.26599/TST.2018.9010052.

13. Haowei Z., Junwei X., Zhaojian Z., Bin Feng Z. et al. Pulse interleaving scheduling algorithm for digital array radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 67–73. DOI: 10.21629/JSEE.2018.01.07.

14. Lee Ch.-G., Kang P.-S., Shih Ch.-S., Sha L. Radar dwell scheduling considering physical characteristics of phased array antenna. *Proc. Intern. Symp. on System-on-Chip*, 2003, pp. 14–24. DOI: 10.1109/REAL.2003.1253250.

15. Chernova I.V., Todosheva A.S. Peculiarities of the realization of the transceiver module of active phased antenna arrays. *T-Comm*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 27–31 (in Russ.).

16. Ezopov A.V. Increasing the output power level of the transmit-receive modules of active phased antenna arrays. *Ph.D. Thesis*, Saratov, Yuri Gagarin State Tech. Univ. of Saratov, 2011, 20 p. (in Russ.).

17. Turkicheva S.V. Development and construction of a four-channel transceiver module of an active phased antenna array. *Proc. XIV Youth Sci.-Pract. Conf. Radar and Communication – Promising Technologies*, 2016, pp. 46–48 (in Russ.).

18. Abolduev I.M., Borisov O.V., Gerasimov A.O., Kolkovsky Yu.V., Minnebaev V.M., Osipovsky A.A. et al. Antenna modules for X-band AESA. *Nanoindustry*, 2018, no. 9, pp. 505–510. DOI: 10.22184/1993-8578.2018.82.505.510 (in Russ.).

19. Babaytsev A.V., Ventsenostsev D.L., Rabinsky L.N., Radchenko V.P. Estimation of thermal modes of the transmit-receive module of the active electronically scanned array. *Izv. TulGU. Technical Sciences*, 2017, no. 9, pp. 365–374 (in Russ.).

20. Zhang W., Wu Q., Zhao S. Thermal design of T/R modules in airborne phased array antenna. *Advances in Computer Science Research*, 2017, vol. 62, pp. 415–418. DOI: 10.2991/jimec-17.2017.91.

21. *MathWorks. Support. Documentation. Thermal Models*. Available at: https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/thermal-models.html?s_tid=CRUX_lftnav (accessed January 10, 2021).

22. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Basics of Heat Transfer*. Moscow, 1977, 343 p. (in Russ.).

23. Kashin V.A., Kuzin A.A., Ryndyk A.G. Conveyor processing of radar signals. *Digital Signal Processing*, 2009, no. 2, pp. 47–51 (in Russ.).

24. *Radartutorial.eu. Radar Signal Processor*. Available at: <https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp05.en.html> (accessed January 10, 2021).

25. *Bitbucket. 2_Radar_Models*. Available at: https://bitbucket.org/2ModelRadar/2_radar_models/src/master/ (accessed January 10, 2021).

Для цитирования

Непряев А.А., Шпигарь А.Н. Модели анализа и прогноза загруженности вычислительных и энергетических ресурсов радиолокационной станции // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 3. С. 448–456. DOI: 10.15827/0236-235X.135.448-456.

For citation

Nepryaev A.A., Shpigary A.N. The models of analyzing and forecasting load of radar station computing and power resources. *Software & Systems*, 2021, vol. 34, no. 3, pp. 448–456 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.135.448-456.