

УДК 623.5

А.Н. Пифтанкин, Н.А. Пифтанкин

## МОДЕЛИ И ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПВО КОРАБЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Пифтанкин Александр Николаевич**, кандидат технических наук, окончил механико-математический факультет Ульяновского государственного университета. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области автоматизации планирования действий и управления истребительной авиацией. [e-mail: mars@mv.ru].

**Пифтанкин Николай Александрович**, окончил механико-математический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области автоматизации планирования и управления летательными аппаратами. [e-mail: mars@mv.ru].

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы автоматизации процесса управления средствами противовоздушной обороны (ПВО) при прикрытии соединения надводных кораблей. Предлагается использование новых подходов в процессе управления в части самообороны (СО) корабля и ПВО соединения кораблей. Приведены задачи, решаемые при функционировании подсистемы ПВО, и их математические модели. Предлагается новый метод построения процесса функционирования подсистемы ПВО с указанием преимуществ такого построения.

Ключевые слова: корабельное соединение, сопровождение цели, противовоздушная оборона (ПВО), математические модели, зенитно-огневые средства, средства радиоэлектронного противодействия, истребительная авиация, совместное использование, характеристика процесса управления.

**Alexander Nikolaevich Piftankin**, Candidate of Engineering, graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics at the Ulyanovsk State University; chief specialist of Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of publications in the field of automation of fighting-aviation action planning and control. e-mail: mars@mv.ru.

**Nikolay Alexanderovich Piftankin**, graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics at the Lomonosov Moscow State University; chief specialist of Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; author of publications in the field of automation of aircraft planning and control. e-mail: mars@mv.ru.

### Abstract

The article deals with issues of the automation of AAD-control process when covering a surface-ship group. The authors propose to use new approaches to the control process for self-defense of ship and AAD of ship group. The article cites tasks to be solved during the operation of AAD sub-system, their mathematical models, and proposes a new method to build a process of AAD-subsystem operation, indicating its advantages.

Key words: ship group, target tracking, anti-aircraft defense (AAD), mathematical models, anti-aircraft facilities, electronic-warfare facilities, fighting aviation, joint engagement, control-process feature.

Противовоздушная оборона состоит из комплекса мероприятий и боевых действий по отражению нападения воздушного противника. Эффективное противодействие средствам воздушного нападения (СВН) в настоящее время и в ближайшем будущем должно базироваться на развитой системе ПВО и ее мобильной составляющей истребительной авиации.

Для решения задачи отражения СВН противника на соединениях надводных кораблей функционирует посто-

янно действующая система ПВО, состоящая из системы освещения обстановки, зенитно-огневых средств (ЗОС), средств радиоэлектронного противодействия (РЭП) и истребительной авиации.

В общем случае решение задачи системы ПВО корабельного соединения (КС) осуществляется за счет:

- интегрирования средств обнаружения, опознавания и сопровождения целей всех кораблей соединения для создания единого адаптивного информационного поля и

формирования качественной информации для отражения нападения воздушного противника;

- оптимальной организации совместного использования в бою ЗОС, средств РЭП и истребительной авиации;
  - противодействия деградации системы (в том числе за счет ее реконфигурации), возникающей как в результате выхода из строя аппаратуры, так и за счет воздействия организованных помех;
  - высокой степени взаимодействия и интеграции как на уровне отдельно взятого корабля, так и на уровне КС.
- Как правило, качество процесса управления, в том числе и ПВО, характеризуется следующими свойствами [1]:
- устойчивость,
  - непрерывность,
  - оперативность,
  - скрытность,
  - обоснованность.

В данной работе предлагается рассмотреть отдельные задачи ПВО корабля (самообороны) и корабельного соединения и попытаться выявить влияние каждой из рассматриваемых задач на различные характеристики процесса управления ПВО, представленные в таблице.

Таблица

Характеристики процессов управления

№ п/п	Характеристика процесса управления	Факторы и показатели, определяющие характеристику процесса
1	Оперативность	Время цикла процесса управления
2	Обоснованность	Степень соответствия принятого решения оптимальному
3	Скрытность	Вероятность сокрытия от противника проводимых мероприятий по управлению до заданного момента
4	Устойчивость	Вероятность надежного управления
5	Непрерывность	Длительность перерыва в управлении

Решение задачи ПВО как своего корабля, так и соединения можно представить как решение двух задач: формирование данных по воздушной обстановке и управление средствами ПВО. Таким образом, процесс ПВО имеет две составляющие: командную и информационную.

### СИСТЕМА САМООБОРОНЫ КОРАБЛЯ

Для простоты предлагается сначала рассмотреть процесс ПВО в части обеспечения самообороны корабля, в частности таких характеристик процесса, как оперативность и устойчивость. Основными средствами при обеспечении самообороны корабля являются ЗОС и средства РЭП (в иностранной литературе эти средства называют оружием жесткого и мягкого ПВО). Непосредственная цель автоматизации задачи самообороны – это выработка

своевременного, обоснованного и оптимального в смысле выбранных критериев плана распределения стрельбовых каналов ЗОС на цели противника. Минимальный состав подсистемы управления ЗОС при обеспечении ПВО корабля может быть следующим:

- прибор сопряжения с источниками информации и аппаратурой управления ЗОС;
- прибор базы данных;
- прибор управления и отображения тактической обстановки и состояния ЗОС.

В общем случае в алгоритме функционирования корабельной подсистемы ПВО участвуют следующие задачи:

- задача формирования единого информационного поля (ЕИП) (формирует обобщенную обстановку по данным от источников вторичной информации);
- задача самообороны;
- задача распространения формуляров ЕИП по сети.

С помощью UML-диаграммы можно описать обобщенный процесс функционирования подсистемы (рис. 1).

Данная модель предполагает циклическое решение задачи на основании обобщенной обстановки, что существенно повышает достоверность входных данных (данных по целям). Этот эффект достигается за счет того, что обобщенная информация формируется на основе данных от нескольких источников, и при отказе одного из источников или выдаче им некачественной информации обобщенный формуляр будет подпитываться данными от других источников, имеющих на момент формирования обобщенных данных меньшие среднеквадратические ошибки [2].

Другое преимущество такого построения процесса функционирования заключается в удобстве реализации прикладной задачи распределения ЗОС на цели противника. Задача формирования решения на управление ЗОС включается с заданным циклом, выбирает данные по воздушной обстановке и состоянию ЗОС из ЕИП корабля, производит выработку плана целераспределения (ЦР) и посылку сообщения (запись плана ЦР) в ЕИП. В данном случае задача не включает в себя организацию приема и выдачи по сети. Недостаток данной организации процесса функционирования подсистемы заключается в относительно большом времени цикла управления.

Для более качественной организации подсистемы в части оперативности управления необходимо сократить время цикла управления. Для этого для организации функционирования подсистемы предлагается применить сигнальную обработку информации. Для этого в различных операционных системах (в частности типа UNIX) существуют механизмы мультиплексирования ввода/вывода, что позволяет организовать включение соответствующего потока для приема определенного сообщения без задержек по времени и излишней загрузки процессора.

Механизм позволяет процессу сообщить ядру операционной системы, что необходимо подождать, пока не произойдет одно из некоторого множества событий (например, приход сообщения), и вывести процесс из состояния ожидания только тогда, когда произойдет событие или пройдет заданное количество времени. С учетом

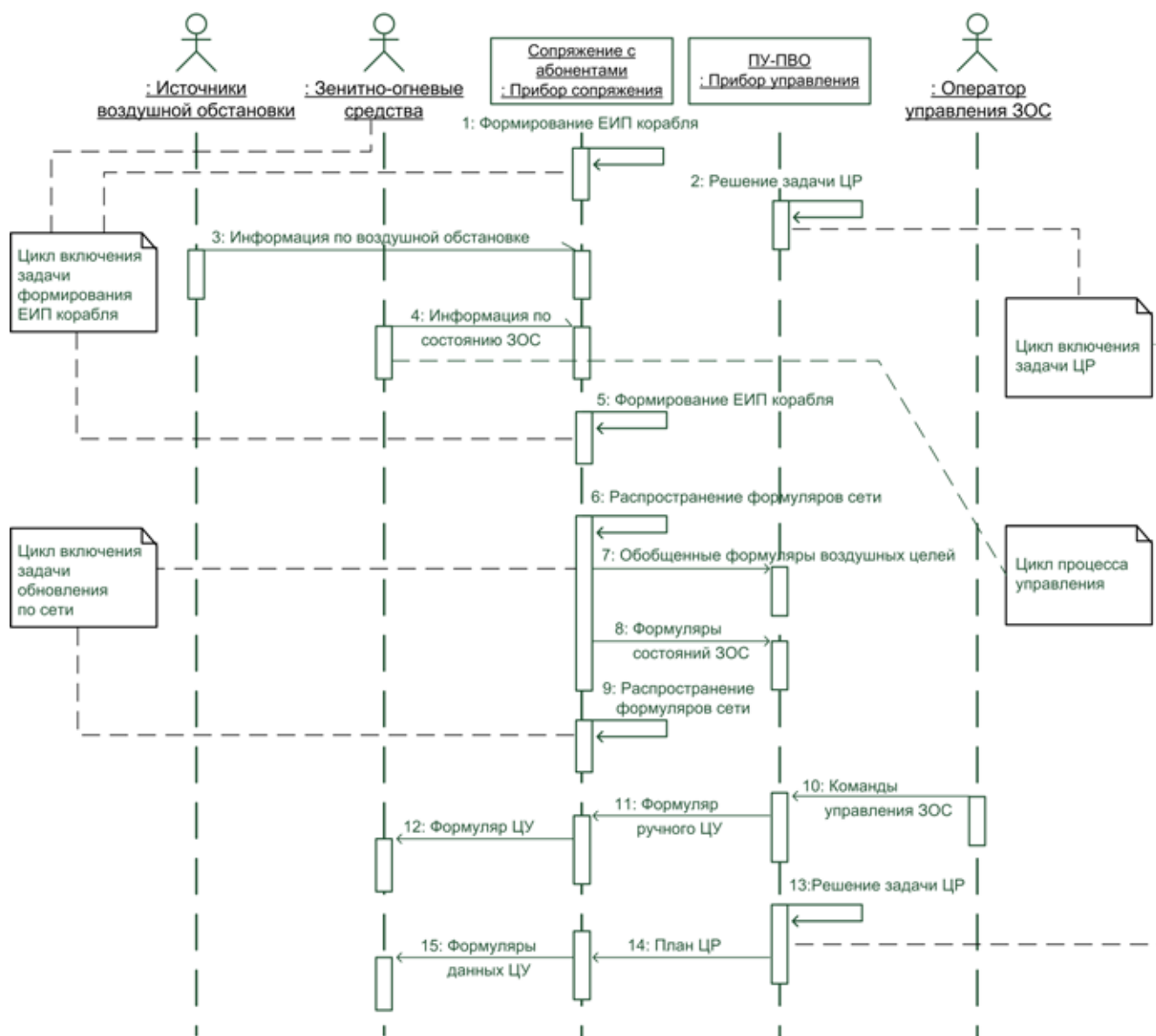


Рис. 1. Диаграмма функционирования подсистемы управления самообороной корабля

представленных доводов можно привести другую организацию функционирования подсистемы управления ЗОС при обеспечении ПВО корабля в ближней зоне. Данная организация представляется с помощью UML-диаграммы (рис. 2). При такой организации время цикла процесса управления сокращается до времени обработки сигнала от средства самообороны. Таким образом, существенно повышается оперативность управления средствами самообороны, однако такая модель требует соответствующей организации межзадачного взаимодействия.

При использовании данной модели повышается оперативность управления, однако устойчивость и достоверность остаются на прежнем уровне, отсутствует фильтрация и комплексирование вторичной информации (которые осуществляет задача отождествления), что может привести к появлению некачественных входных данных по воздушным целям и принятию неверного решения. Приведенные недостатки будут понижать устойчивость

управления ЗОС при обеспечении ПВО в ближней зоне. Для устранения данных недостатков предлагается распределенное решение задачи отождествления по различным потокам: командному и информационному. Предполагается, что задача отождествления в информационном потоке формирует ЕИП корабля в строго определенном цикле (от одной до трех секунд).

При поступлении информации о сопровождаемых целях в командный поток от источников и данных от собственных локаторов средств необходимо, не вмешиваясь в процесс циклического отождествления, обеспечить формирование данных для целеуказания (ЦУ) с учетом последней поступившей информации (рис. 3).

При ранее использовавшемся подходе к формированию данных ЦУ боевая информационно-управляющая система (БИУС) фактически выполняла только функцию передаточного звена между радиолокационной станцией (РЛС) и средством ПВО, на которое данное ЦУ выдается.

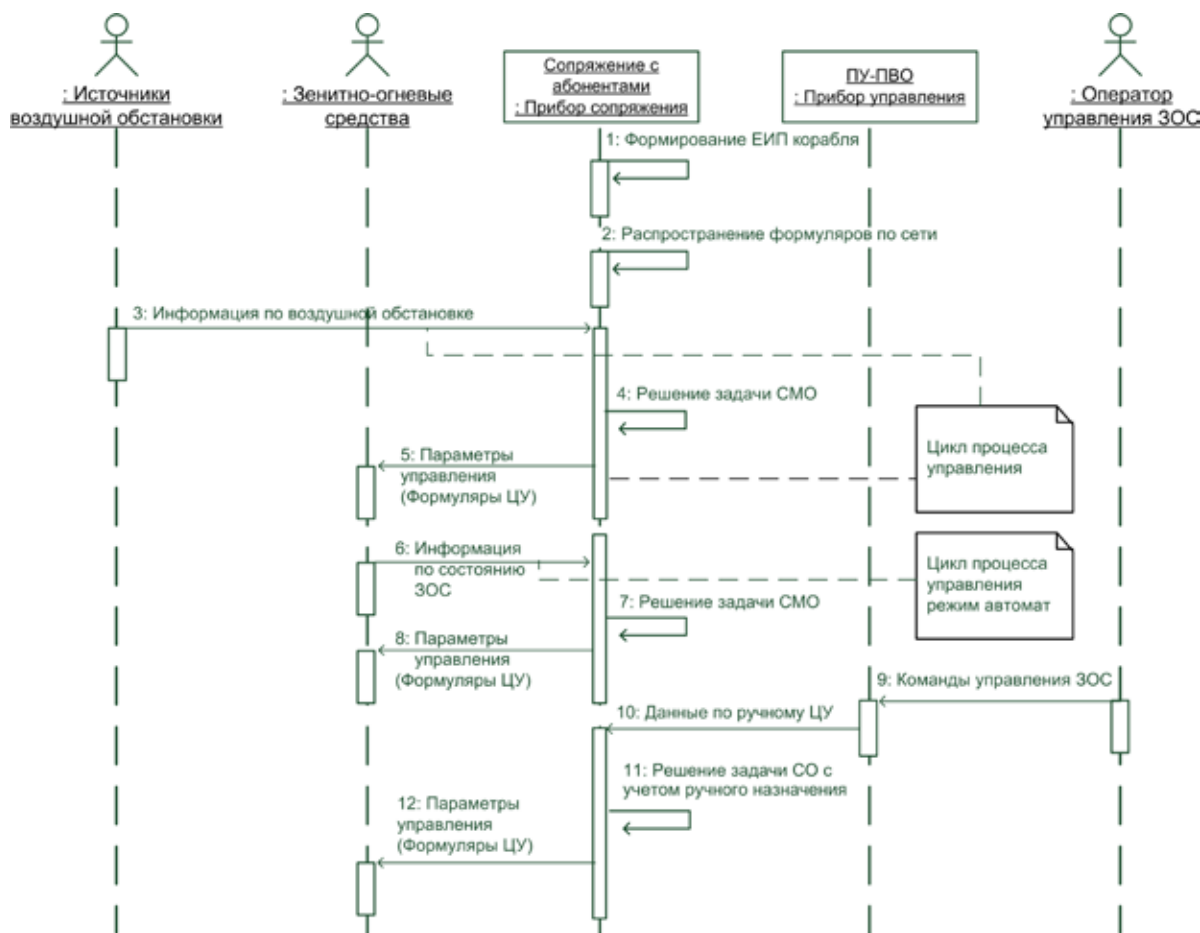


Рис. 2. Модифицированная диаграмма функционирования подсистемы управления самообороной корабля

Циклическая выдача ЦУ вовсе не имела смысла, так как после того, как локатор оружия взял цель на сопровождение, его данные были, как правило, лучше, чем те, которыми владела БИУС на момент выдачи. Это объясняется тем, что погрешности локатора оружия меньше обзорных РЛС и период локации цели тоже существенно меньше, поэтому БИУС после взятия средством цели на сопровождение лишь возвращала данные с большими погрешностями.

Таким образом, применение предлагаемой схемы повысит устойчивость управления и появится смысл в БИУС как в единственном источнике данных с наименьшей погрешностью корабельного радиоэлектронного вооружения на любом этапе работы по цели.

**СИСТЕМА ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ СОЕДИНЕНИЯ**

Система управления ПВО соединения является материальной основой процесса управления ПВО. В связи с этим тактико-технические характеристики (ТТХ) системы управления, как отмечалось ранее, должны удовлетворять всем основным свойствам (устойчивость, непрерывность, оперативность, скрытность, обоснованность). Однако ТТХ системы управления ПВО складывается из ТТХ ее основных подсистем (рис. 4).

Актуальность использования различных методик и интенсивность поисков эффективных механизмов решения задачи управления средствами ПВО КС в повседневной деятельности возрастали в течение многих лет. Эффективные механизмы взаимодействия кораблей необходи-



Рис. 4. Взаимосвязи процессов и систем

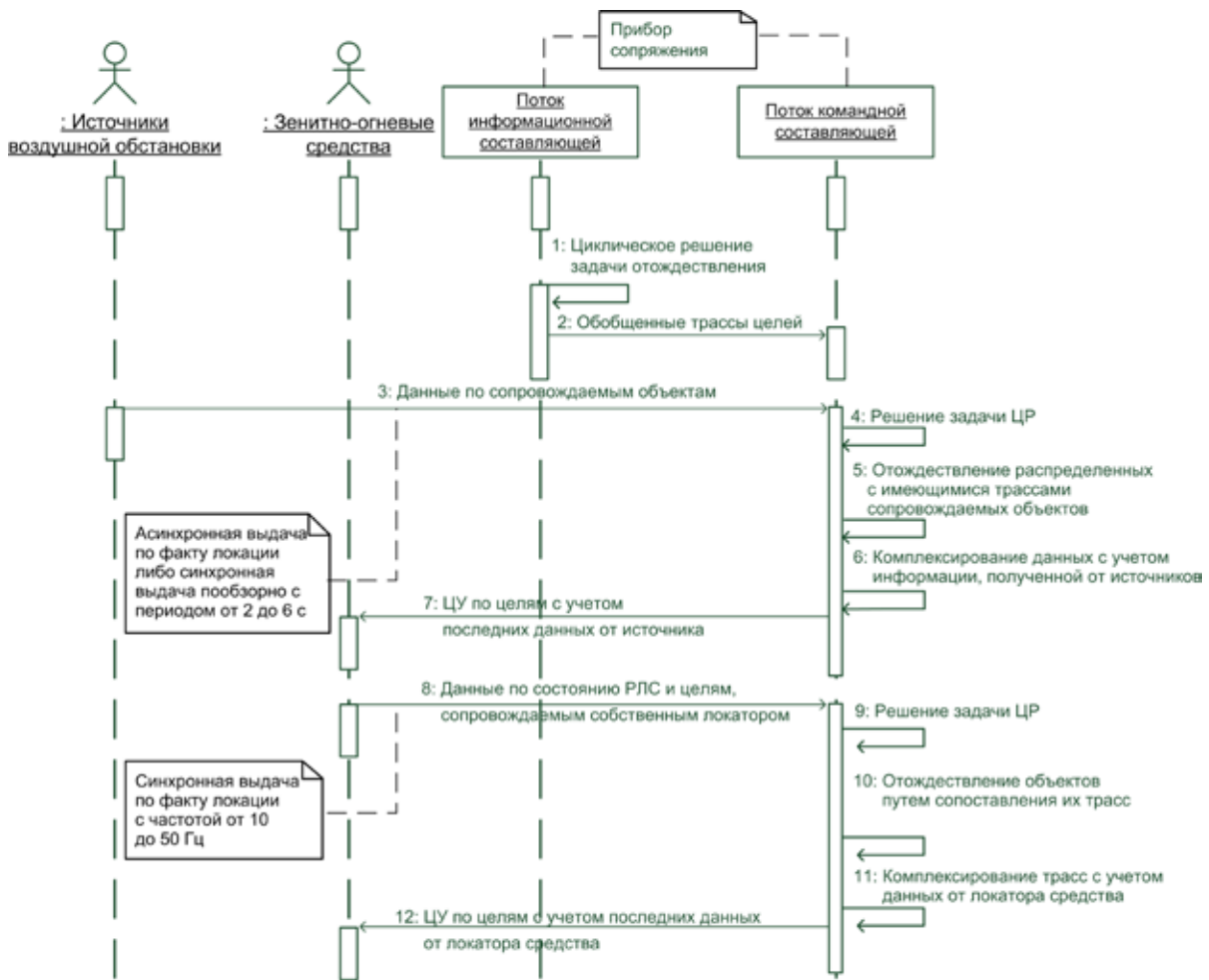


Рис. 3. Схема распределенного функционирования процесса формирования обобщенных данных по потокам

мы для того, чтобы избежать избыточности и нерезультативности действий при обеспечении ПВО, вызванных их несогласованностью.

Появившаяся недавно методика агента – это новая парадигма для разработки программного обеспечения [3], согласно которой предлагается формализация отдельной корабельной системы управления как агента. Простой способ описания агента – это описание его как объекта, воспринимающего окружающую среду и способного

к рациональным реакциям на нее. Однако обозреваемая тактическая обстановка на определенный момент может оказаться настолько сложной, что никакой единственный агент не в состоянии решить все возникающие задачи самостоятельно. В этом случае можно решить такую задачу с помощью сотрудничества отдельных агентов, имеющих ограниченные возможности по добыванию информации, воздействию на окружающую среду и передаче информации. Это подтверждают недавние исследования ис-

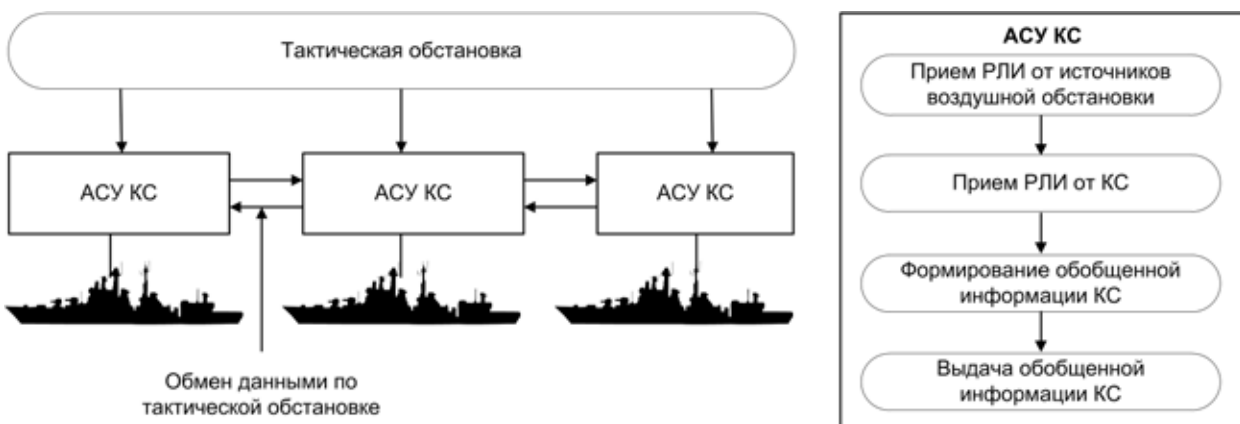


Рис. 5. Схема децентрализованной организации процесса формирования ЕИП КС

пользования совместных агентов для реализации распределенного решения задач в системе [4]. Современная задача ПВО является трудной и требует обработки большого количества данных.

При реализации системы ПВО соединения кораблей возможно применение следующих видов взаимодействия:

- децентрализованная структура;
- централизованная структура (непосредственное подчинение объектов центральному пункту управления);
- иерархическая структура с последовательно-параллельными связями.

Причем информационная и командная составляющие могут быть реализованы по различным схемам. К примеру, существуют случаи организации процесса формирования ЕИП соединения (информационной составляющей процесса ПВО) в виде децентрализованной структуры (рис. 5), в то время как процесс управления средствами ПВО соединения организуется согласно схеме централизованного управления (рис. 6).

В последнее время задача экипажей боевых кораблей становится все более запутанной по причине возрастания изощренности угроз и усложнения систем обороны. Сценарии также становятся все более сложными. Это происходит, главным образом, вследствие возрастания использования боевых кораблей у побережья, а не в открытом море, и постоянно увеличивающейся потребности во взаимодействии кораблей с различными внешними (некорабельными) источниками информации. В случае атаки боевого корабля СВН операторы имеют немного времени для обнаружения, принятия решения и начала ответных действий. Часто проходит меньше минуты между моментом обнаружения угрозы и моментом воздействия на корабль. Данная ситуация требует быстрого принятия решений на основании рассмотрения нескольких важных факторов, позволяющих выработать лучший план действий из всех возможных. Неудача в решении этой задачи может привести к потере корабля и экипажа. Ввиду отсутствия времени для рассмотрения большого числа планов, операторы могут пропустить самые выгодные решения, что приведет к выбору неоптимального плана. Кроме того, в условиях ограничения реального времени командир может делать ошибки из-за сложности обстановки и состояния стресса, вызванного такой ситуацией, что очевидно приведет к плохим последствиям.

В соединении кораблей ресурсы имеют больше ограничений при автономном управлении, чем при организации эффективного взаимодействия, которое может значительно увеличить устойчивость соединения к угрозе. Выбор стратегии действий, передача ее кораблям соединения и корректировка первоначального плана в процессе распространения информации – все это должно вы-

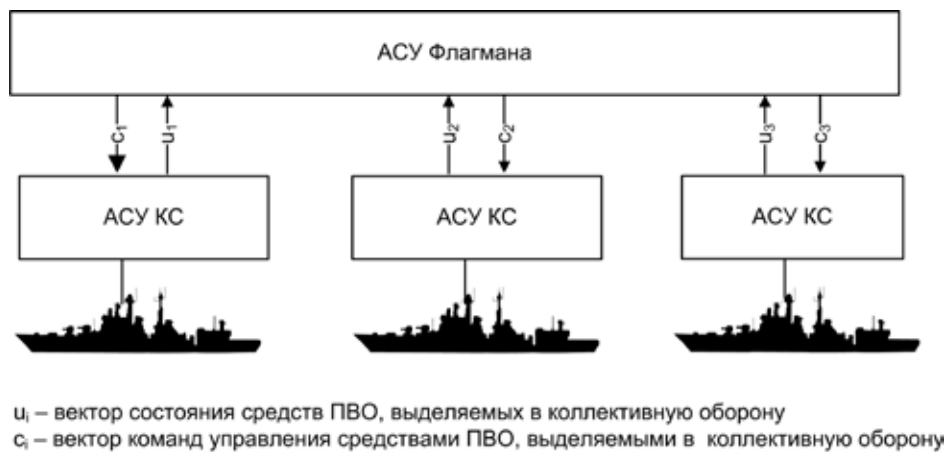


Рис. 6. Схема централизованной организации процесса управления средствами ПВО

полняться с учетом временных ограничений. Эта ситуация создает существенные проблемы перед корабельными системами и перед операторами, использующими эти системы для обороны кораблей. Рассматривая сложность проблемы и тот факт, что аппаратные средства могут работать и обмениваться информацией значительно быстрее, чем люди, можно с уверенностью утверждать, что надежная бортовая командная подсистема управления ПВО (то есть программный агент, который будет помогать операторам в принятии решений) предпочтительна для решения задачи ПВО в современных условиях.

Рассматривая соединение боевых кораблей с АСУ на каждом корабле, можно рассматривать его, как систему мультиагента, в которой различные корабельные системы реализуют и поддерживают оптимальное взаимодействие между отдельными кораблями соединения.

Основной задачей системы управления КС является реализация эффективного управления всеми ресурсами (оружием, РЛС, электронными системами и т. д.) этого соединения для увеличения возможности отражения нападения противокорабельных ракет. Поскольку вычислительный ресурс управления соединением является комплексом распределенных задач, нужно полагаться на сотрудничество между агентами, формирующими систему мультиагента, при управлении ресурсами для увеличения жизнеспособности соединения. Вначале необходимо отметить, что, так как боевые корабли должны реагировать на угрозы в реальном времени, невозможно принять на вооружение классический комплексный план взаимодействия между агентами, включающий в себя:

- обнаружение и ранжирование целей;
- создание автономных планов распределения;
- разрешение конфликтов автономных планов и выработку общего плана;
- осуществление соответствующих частей объединенного плана.

Вместо этого они должны следовать методу, в котором КС согласует совместное распределение целей, а каждый корабль только планирует собственное распределение целей.

Кроме того, методы взаимодействия можно разбить на три различных типа:

1) основанные на обмене сообщениями, где агенты полагаются на обмен информацией между собой для реализации согласованного взаимодействия, например возможность выдачи ЦУ с одного корабля соединения на средство другого;

2) основанные на соглашениях, где агенты полагаются на заранее сформулированные правила, для управления взаимодействиями между агентами, например назначение секторов ответственности каждому кораблю соединения;

3) основанные на обучающих процедурах, где агенты обучаются взаимодействию, анализируя ошибки испытаний (например, можно вести статистику по удачным отражениям СВН для каждого корабельного средства ПВО в составе соединения и при распределении угроз ее учитывать).

В данной статье предлагается рассмотреть метод взаимодействия, основанный на обмене сообщениями. Его также называют централизованной координацией.

Механизм централизованной координации (централизованного управления) основан на связи с центральным координатором – флагманским кораблем [5]. Концепция централизованной координации заключается в том, что центральный агент производит сбор информации и вырабатывает решения распределенной задачи согласно этой информации. В данном случае, собирается информация по опасным целям от каждого агента. Процесс централизованного управления может быть описан следующим образом:

- выбор координатора соединения (флагманского корабля);
- при обнаружении одной или более целей, каждый агент-корабль рассчитывает вероятности поражения каждой цели и посылает их координатору;
- центральный координатор создает матрицу возможностей;

– координатор решает, как назначить поступающие угрозы кораблям, используя матрицу возможностей и алгоритм оптимизации;

– координатор посылает уведомляющие сообщения о распределении выбранным агентам-кораблям.

Сам алгоритм распределения должен вырабатывать оптимальный, с точки зрения соединения, план [6]. С теоретической точки зрения, можно было обойтись решением задачи выработки оптимального плана относительно выбранного критерия всех средств ПВО КС на отражение всех угроз противника. Тогда может возникнуть ситуация назначения, представленная на рисунке 7. При качественном сопровождении и достаточной разрешающей способности (чтобы обеспечить разрешение всех объектов в группе) данный вариант имеет право на существование.

Однако важно, чтобы математическая модель боя правильно отражала наиболее существенные стороны исследуемого процесса и была чувствительна, в первую очередь, к регулируемым органам управления (ПУ ПВО) параметрам, определяющим существо того или иного решения. При групповом налете, учитывая возможности современных истребителей и штурмовиков, локация данных целей обзорными РЛС будет давать, скорее всего, различное число целей в группе, так как некоторые из них будут сливаться.

При назначении целей из разных групп на средства одного корабля или на одно средство теряется устойчивость динамического решения задачи, что приводит к далеко не рациональному распределению средств на цели. В качестве альтернативы предложенному предлагается подход, основанный на двухуровневой оптимизации [7]. Объектами первого уровня являются корабли (агенты согласно выбранному способу формализации) и группы целей, а объектами второго уровня – каналы средств и цели.

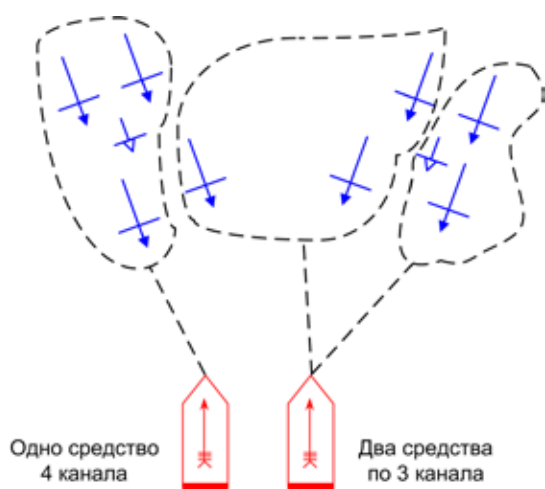


Рис. 7. Вариант распределения целей на средства при одноуровневой оптимизации

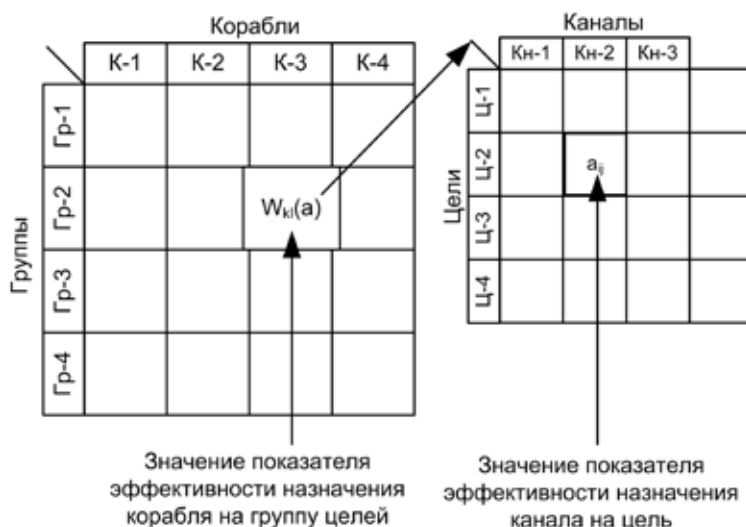


Рис. 8. Матрицы оптимизации первого и второго уровней

$$W(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} a_{ij} \longrightarrow \max,$$

$$\sum_{i=1}^n c_{ik} = 1 (k = 1..n), \sum_{j=1}^n c_{lj} = 1 (l = 1..n),$$

где  $c_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ .

Чтобы оценить распределение корабля на заданную группу целей, необходимо составить план распределения каналов средства на определенные цели группы. Таким образом, для каждой пары «группа целей – корабль» составляется оптимальный план назначения каналов средства на цели. По данному плану рассчитывается суммарная опасность назначенных целей, входящих в план, что будет являться оценочным параметром распределения корабля на группу целей.

$A$  – оценочная матрица назначения корабля на группу целей:

$$A = \{a_{lk}\}, l = 1..n, k = 1..m,$$

где  $n$  – количество кораблей,

$m$  – количество целей.

$B^k$  – оценочная матрица назначения  $l$ -го корабля на  $k$ -ю группу:

$$B^{lk} = \{b_{ij}^{lk}\}, i = 1..n_l, j = 1..m_k,$$

где  $n_l$  – количество каналов  $l$ -го корабля;

$m_k$  – количество целей в  $k$ -й группе.

Целевая функция максимизации по параметру опасности для назначения каналов  $l$ -го средства на цели  $k$ -й группы будет выглядеть следующим образом:

$$W(B^{lk}) = \sum_{i=1}^{n_l} \sum_{j=1}^{m_k} c_{ij} b_{ij}^{lk} \longrightarrow \max,$$

$$\sum_{i=1}^{n_l} c_{ir} = 1 (r = 1..n_l), \sum_{j=1}^{m_k} c_{rj} = 1 (r = 1..m_k),$$

где  $c_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ .

Обозначим  $a_{lk} = W(B^{lk}), l = 1..n, k = 1..m$ .

Целевая функция максимизации по параметру опасности распределенных целей для кораблей на группы целей будет выглядеть следующим образом:

$$W(A^{lk}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} a_{ij} \longrightarrow \max,$$

$$\sum_{i=1}^m d_{ir} = 1 (r = 1..n), \sum_{j=1}^n d_{rj} = 1 (r = 1..m),$$

где  $d_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ .

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСТРЕБИТЕЛЬНОЙ АВИАЦИИ

Подход, основанный на двухуровневой оптимизации, требуется и при решении задач управления истребительной авиацией. Вызвано это может быть существующими ограничениями, накладываемыми на аппаратуру обмена данными с летательным аппаратом (ЛА), а также иерархической схемой управления (рис. 9).

Согласно выработанным планам, истребители распределяются на группы, в состав которых в зависимости от ситуации могут входить один, два, три или четыре истребителя. Таким образом, система связана каналом для управления только с командирами групп. При решении задачи ЦР требуется оптимальным способом распределить истребители на цели. В контексте существующих ограничений будет стоять задача оптимально распределить группы истребителей на группу целей, что повлечет за собой решение задачи двухуровневой оптимизации. На первом уровне оптимизации оценивается эффективность распределения одиночного истребителя на цель. На втором уровне оптимизации по результатам оценок первого уровня производится оценка эффективности распределения истребителей на группы и решается задача оптимального распределения группы истребителей на группу целей. Данный метод дает возможность обеспечить качество решения задачи при существующих ограничениях, что повышает обоснованность принимаемого решения.

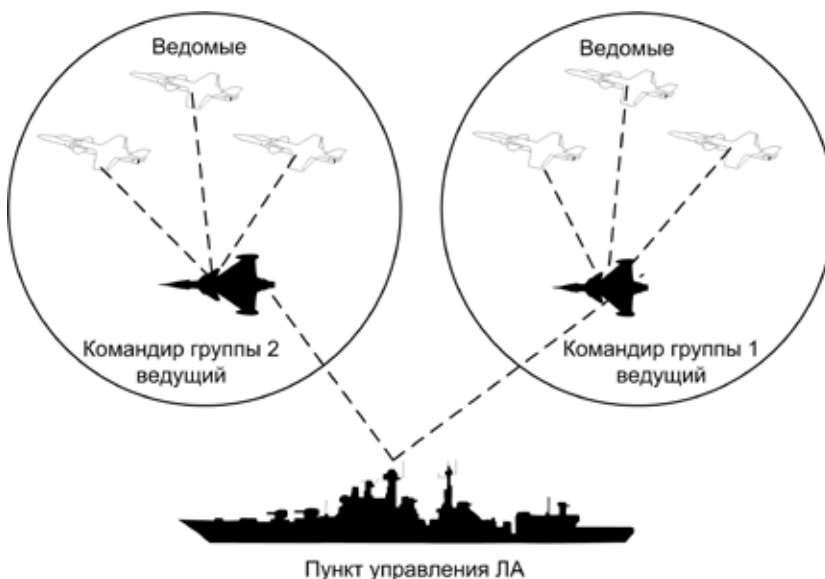


Рис. 9. Структура схемы управления летательными аппаратами



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложенные модели задач и подходы к их решению могут оказаться полезными для разработчиков программного и математического обеспечения систем ПВО соединения, к которым предъявляются повышенные требования по оперативности, всесторонней обоснованности вырабатываемых решений и устойчивости функционирования.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ильин В.А. Система ПВО соединения кораблей : монография. – СПб. : ВСОК ВМФ, 2006.
2. Воскресенский В.В., Доценко С.М., Чудаков О.Е. Информационное обеспечение управления и флот. – СПб. : НИКА, 2002.
3. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. Chichester, England: M. Athans, "Command and control (c2) theory : a challenge to control science" // IEEE Transactions on Automatic Control, April 1987. vol. AC-32, No. 4. pp. 286–293.
4. Blodgett D., Paquet S., Plamondon P., Chaib-draa B., and P. Kropf, "Coordinating plans for agents performing AAW hardkill and softkill for frigates," // Proceedings of The 2001 AAAJ Fall Symposium Series, North Falmouth, MA, July 2001. pp. 1–8.
5. Beaumont P. "Multi-platform coordination and resource management in command and control" Master's thesis, Computer Science & Software Engineering Department, Laval University, 2004.
6. Maheswaran R. T., Tambe M., and E. Bowring "Taking dco to the real world: efficient complete solutions for distributed multi-event scheduling" // Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS'03), N. Jennings, C. Sierra, L. Sonenberg, and M. Tambe, Eds. ACM Press, 2004, pp. 310–317, 19–23 July 2004, NY, USA.
7. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.