

УДК 004.896

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СКОПЛЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В НЕДРУЖЕСТВЕННОЙ СРЕДЕ

© В. К. Абросимов¹, Е. С. Михайлова²

¹Министерство обороны Российской Федерации,
119160, Москва, ул. Знаменка, 19

²ПАО НПО «Алмаз» им. академика А. А. Расплетина,
125190, Москва, Ленинградский просп., 80, к. 16
E-mail: avk787@yandex.ru, ekaterinaolimp99@mail.ru

Рассматривается конфликтная ситуация, связанная с движением скоплений, включающих сотни объектов управления малых размеров в поле ответственности радиолокационной станции внешнего наблюдателя. Задача внешнего наблюдателя — следить и сопровождать движение скопления, а при возникновении угрожающей ситуации воздействовать на него. Задача скопления заключается в создании максимальной неопределённости принятия решения внешним наблюдателем. Модель движения скопления разработана как модель поведения роя К. Рейнольдса, дополненная специальными коэффициентами. Разработано три метода формирования различных скоплений, близких к геометрическим и изменяющимся в процессе движения формам. Сформулирована и математическим моделированием подтверждена гипотеза о том, что за счёт вариации геометрии, формы и количества объектов в роевом скоплении потенциально возможно создать ситуации, при которых рой будет восприниматься внешним наблюдателем как единый, отличающийся от исходного крупный объект. Показано, что если критерием принятия решения является значение эффективной поверхности рассеивания, то возможно создавать скопления, имитирующие опасные объекты.

Ключевые слова: группа, рой, объект управления, неопределённость, формация, модель.

DOI: 10.15372/AUT20230402

Введение. В последние 5-7 лет в различных прикладных областях народного хозяйства появилось много новых постановок задач, выполнение которых требует использования группы объектов управления. При переходе к групповому управлению основными влияющими факторами становятся миниатюризация и стоимость. Это составляет две главные проблемы в создании больших групп, поэтому простоте каждого члена группы должно уделяться особое внимание. Оправданным является подход с использованием роевого интеллекта для достижения значимого поведения на уровне группы, а не на индивидуальном уровне. К крупным достижениям в области группового управления можно отнести новые методы агрегации групп, методы согласованного движения группами, стаями, роями, методы распределения задач в группах [1]. Группа, состоящая из сотен мелких элементов, в пространстве и времени может принимать различные формы, которые не всегда можно строго описать геометрическими фигурами. Будем называть такое большое количество скопившихся в одном месте объектов, по версии работы [2], «скоплением».

Рассмотрим конфликтную задачу между группой объектов управления, выполняющих заданную миссию, и внешним «Наблюдателем», для которого такая миссия является нежелательной. Примером такого конфликта является стремление группы объектов управления нанести ущерб территории, охраняемой внешним Наблюдателем. «Создатель» скопления формирует размер роя и управляет его пространственно-временной структурой. Внешний

Наблюдатель (моделируемый, например, радиолокационной станцией (РЛС)) контролирует поведение и характер манёвров скопления для оценки степени его угрозы. Средства обороны задействуются, когда суммарная величина, по значению которой в радиолокации часто принимается решение (например, эффективная площадь рассеяния (ЭПР)), превышает определённое значение. В литературе достаточно активно обсуждаются такие варианты (например, в [3]).

Создателем роя могут предприниматься «нецелесообразные», с точки зрения наблюдателя, решения, которые тем не менее заранее планируются и являются элементами коллективной стратегии поведения роя. Тогда основной задачей Создателя скопления становится формирование таких пространственно-временных структур, при которых ЭПР будет ниже заданных значений, либо создание пространственных образований из ложных элементов, в сумме образующих значительную ЭПР, напоминающую опасный объект. Последовательные изменения геометрии и нецелесообразные расположения в пространстве объектов скопления (от плотных образований до рассеянных объектов) создают неопределённость в принятии решения внешним Наблюдателем.

Целью представленного исследования является разработка методов формирования разнообразных пространственно-временных форм скоплений значительного количества объектов малых размеров для формирования ЭПР, существенно затрудняющих как наблюдение за скоплением внешнего Наблюдателя, так и принятие им решений по нейтрализации опасного объекта.

1. Постановка задачи.

Дано:

- 1) декартова система координат XYZ ;
- 2) N одинаковых объектов управления пренебрежимо малых размеров, образующих некоторое скопление;
- 3) каждый объект обладает заданной ЭПР;
- 4) начальное расположение элементов — случайное в области радиуса $R \leq R_{\text{fix}}$;
- 5) внешний Наблюдатель в виде РЛС с характеристиками: а) начальное расположение — точка с заданными координатами; б) диаграмма направленности — конус с заданным углом «полураствора» (град); в) заданная дальность действия (км).

Требуется:

1. Разработать методы формирования различных пространственно-временных скоплений (на плоскости) в форме, подобной геометрическим фигурам типа Точка, Диск, Круг, Многоугольник, Случайное двухмерное плоскостное скопление; в пространстве: Шар, Цилиндр, Параллелепипед, Случайное трёхмерное пространственное скопление.

2. Создать условия, при которых общая ЭПР скопления будет критической для внешнего Наблюдателя.

2. Разработка модели движения скопления. В основу модели движения скопления положим известный роевой алгоритм К. Рейнольдса, реализующий три понятные парадигмы для каждой частицы роя: а) каждая частица не приближается к другой ближе заданного ограничения, б) вектор скорости каждой частицы стремится к среднему вектору скорости всех частиц, в) каждая частица стремится к геометрическому центру масс своей локальной окрестности [4]. Существенные преимущества такой модели, когда рой формируется как плотное, одновременно перемещающееся в пространстве и времени скопление одинаковых частиц, для поставленной задачи являются недостатком, так как по самим правилам роевого движения, если соседние объекты условно «примут вправо», то и каждый объект направится в эту же сторону, что создаёт ненужную предсказуемость [5].

Для формирования пространственно-временных структур, целенаправленных для Создателя и хаотичных для Наблюдателя, целесообразно попробовать варьировать в широ-

ких пределах значениями постоянных коэффициентов, нивелируя тем самым случайную составляющую движения частиц роя. Тогда будем использовать следующую модель:

$$x_i = x_{i-1} + tv_{ix}; \quad y_i = y_{i-1} + tv_{iy}; \quad z_i = z_{i-1} + tv_{iz}, \quad (1)$$

$$v_{ix} = \alpha_x v_{i-1,x} + \beta_x f(x_{i-\text{best}} - x_i) + \gamma_x f(x_{\text{superbest}} - x_i),$$

$$v_{iy} = \alpha_y v_{i-1,y} + \beta_y f(y_{i-\text{best}} - y_i) + \gamma_y f(y_{\text{superbest}} - y_i),$$

$$v_{iz} = \alpha_z v_{i-1,z} + \beta_z f(z_{i-\text{best}} - z_i) + \gamma_z f(z_{\text{superbest}} - z_i).$$

В формуле α_x , α_y и α_z — постоянные ускорения, $\{x_{i-\text{best}}, y_{i-\text{best}}, z_{i-\text{best}}\}$ — лучшая точка пространства, куда необходимо перемещаться элементу роя; $\{x_{\text{superbest}}, y_{\text{superbest}}, z_{\text{superbest}}\}$ — лучшая точка пространства из пройденных всеми элементами; f — случайное число в интервале $(0, 1]$. Алгоритм имеет итерационный характер. На каждой i -й итерации уточняется величина, направление вектора скорости v_i и положение x_i каждой из частиц с учётом найденных оптимальных значений на предыдущих итерациях. Обычно рекомендуется подбирать коэффициенты в окрестности определённых значений (например, $\beta_x \sim 0,5$, β_x и $\beta_z \sim 1,5$), но в данной модели допускается более широкое и разнообразное их варьирование, однако всё же в заданных пределах.

Рассмотрим потенциально возможную стратегию внешнего Наблюдателя. В процессе принятия решений часто реализуется «суждение по представительности» — вероятность того, что объект А принадлежит к классу В, логически связывается только по схожести А на типовой объект класса В. Для этого наблюдателю обязательно иметь статистическую выборку определённой размерности, чтобы выработать показатели критериев схожести. При формировании в скоплениях различных фигур, близких к геометрическим, и периодическом переходе от одной фигуры к другой, вплоть до случайного рассеивания объектов в пространстве, наличие соответствующих выборок для отнесения поведения объекта к рациональному становится мало возможным. Поэтому рассуждение внешнего Наблюдателя «по представительности» будет затруднено.

В процессе принятия решений часто реализуется «суждение по встречаемости», при котором вероятности событий определяются по тому, как часто происходили такие события и насколько они были значимы для решения задач. Для использования «суждений по встречаемости» необходима наработка соответствующих прецедентов. Предполагается, что каждый случай движения скопления можно сделать для внешнего Наблюдателя уникальным. Поэтому «суждение по встречаемости» ему также будет трудно выработать.

Наблюдателю остаётся фиксировать параметры движения скопления, экстраполируя его траекторию и оценивая степень угрозы. Прогнозирование движения скопления осуществить довольно легко, если оно имеет компактную форму. И если компактное скопление движется в направлении, представляющем угрозу для наблюдателя, то миссия скопления сравнительно предсказуема и его стратегии рациональны.

Поэтому иррациональность поведения скопления, которая является основой стратегии Создателя роя, будет заключаться в изменении формы скопления в пространстве и времени, возможно, с постепенным «разроением», т. е. образованием более мелких по объёмам роев, а также существенным изменением пространственно-временной структуры скопления в течение непродолжительного времени.

Введём следующую рабочую гипотезу.

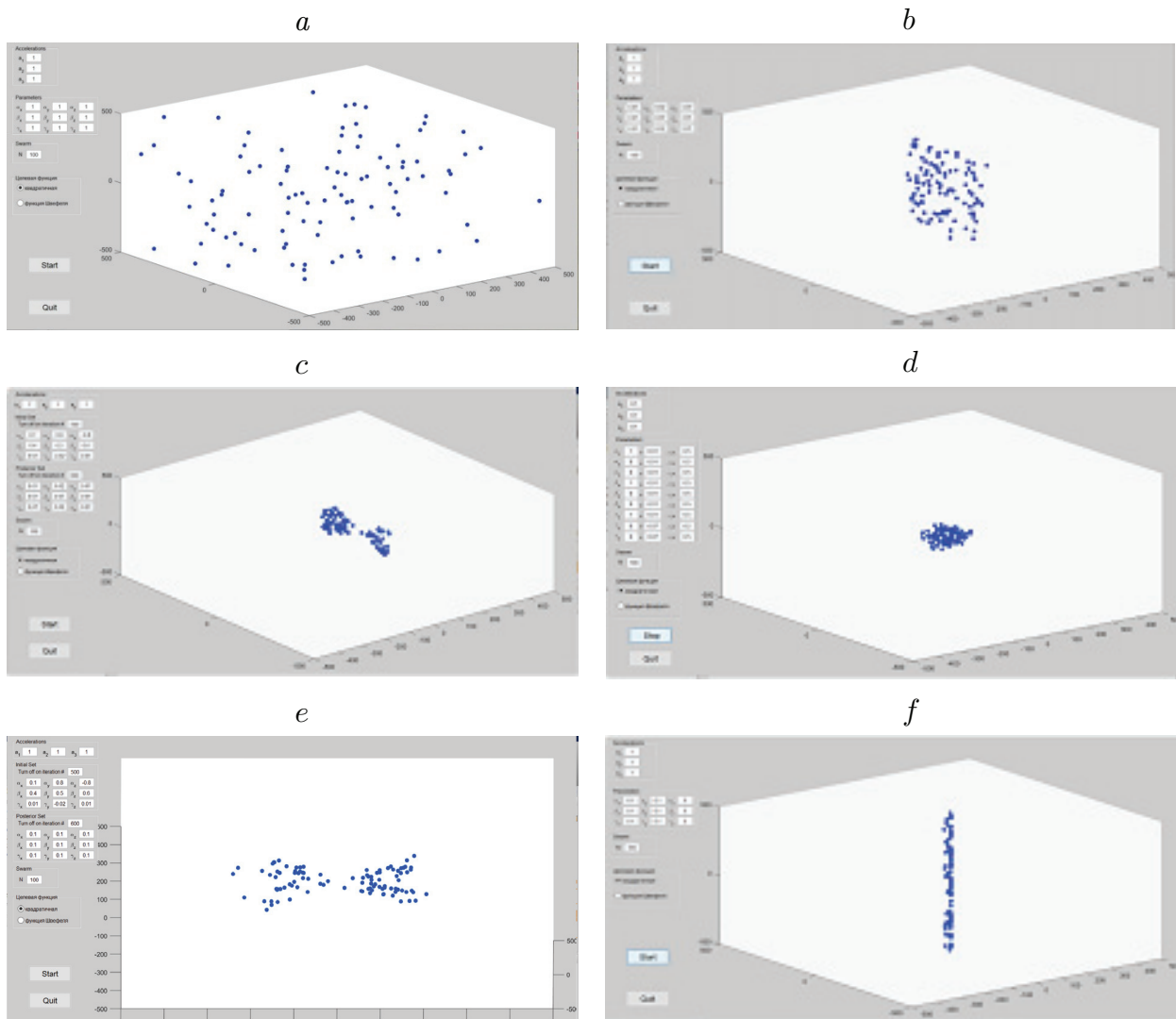


Рис. 1. Иллюстрация формирования скоплений: *a* — исходное положение роя, *b* — рой принял форму распределённого эллипсоида, *c* — плотное разроение роя, *d* — рой принял форму шарообразного скопления, *e* — близкая к симметричной распределённая структура, *f* — рой вытянут в вертикальную линию

За счёт варьирования количеством объектов, плотностью роя и скоростью его перемещения возможно сформировать различные вариации геометрических форм роевого скопления и потенциально создать ситуации, при которых рой будет восприниматься внешним Наблюдателем как единый, отличающийся от исходного, крупный объект с критической ЭПР, что заставит внешнего Наблюдателя принимать ошибочные решения [6].

3. Модели формирования пространственно-временных скоплений. В процессе исследований разработано три метода формирования различных пространственно-временных форм скоплений, реализованные с использованием пакета прикладных программ МАТЛАБ версии R2010b для операционной системы Linux. Всего при применении этих методов получено свыше 50, в том числе заданных постановкой задачи, различных форм скоплений. Представим только некоторые, но характерные результаты (рис. 1).

3.1. Метод вариаций параметров модели.

Этот метод заключается в том, чтобы за счёт варьирования коэффициентами α , β , γ

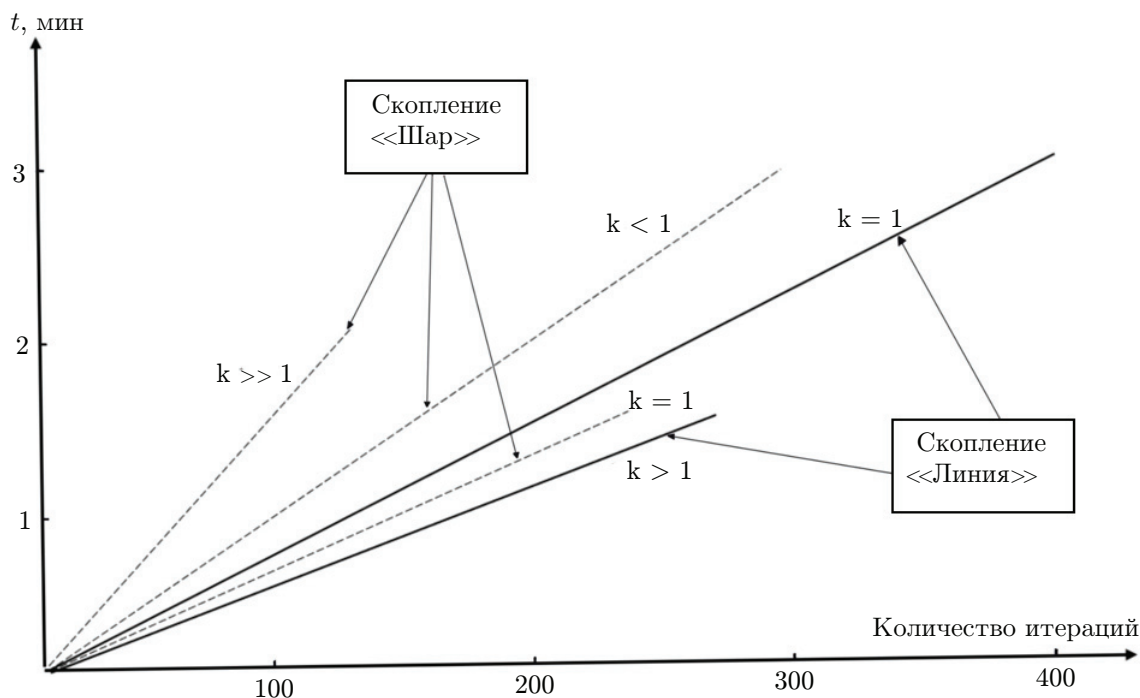


Рис. 2. Зависимости ускорения процесса формирования скоплений при реализации метода переменных параметров

формулы (1) изменять характеристики скопления: как расстояния между объектами, так и скорость изменения этих расстояний. В первых слагаемых выражений (1) коэффициенты α определяют изменение скорости: знак α определяет ускорение или замедление, величина α — степень ускорения или замедления. Вторые слагаемые влияют на значимость для данного объекта стремления к собственной наилучшей точке пространства в предыдущей итерации по соответствующим осям координат. Следовательно, изменяя коэффициент β , можно усиливать или ослаблять соответствующий фактор формирования роя; указанная составляющая является как бы «личной» оценкой стремления объекта управления к наилучшему решению. И наконец, коэффициент γ учитывает степень стремления каждого объекта к точке, которая является лучшей для всего скопления, что, как представляется, должно в наибольшей степени влиять на объём скопления.

К сожалению, метод требует значительных трудозатрат по подбору коэффициентов для получения требуемых фигур. Установить необходимые закономерности на данном этапе исследования, за исключением влияния коэффициента α на характеристики скорости перемещения скопления, пока не удалось. Поэтому реализация метода вариаций осуществлялась постепенным перебором значений коэффициентов в определённых пределах.

3.2 Метод образования скоплений за счёт переменности коэффициентов модели.

Метод переменных параметров заключается в том, что выбранные (один или все) коэффициенты $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ в течение процесса итераций меняются по линейному закону с заданным коэффициентом $\pm k$ в пределах заданных допустимых значений от максимально до минимально заданных значений, кроме нуля:

$$\alpha_q(t) = \alpha_q \pm kt, \quad 0 < \alpha_q \leq \alpha_q^*, \quad q = x, y, z. \quad (2)$$

Анализ результатов моделирования показывает, что при изменении параметров $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ по линейному закону с заданным одинаковым коэффициентом $\pm k$ (равномерное

увеличение или снижение скорости) скопление из исходного положения быстрее (в зависимости от значения k до 40–50 %) образует скопление «протяжённая линия», чем при тех же фиксированных значениях коэффициентов $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ (рис. 2). Коэффициент k при этом менялся в пределах от 0,1 до 3,1. В числовом выражении это составляло от 1 до 3 мин компьютерного времени. Указанные данные по временам формирования скоплений являются исключительно ориентировочными, так как значительно зависят как от коэффициента k , так и от характеристики компьютера, на котором установлена модель. Однако указанный метод позволяет варьировать временем прихода скопления в заданную область, пусть даже и контролируруемую РЛС, т. е. ускорить либо задержать его. В целом при изменении коэффициентов по линейному закону заданное скопление формируется быстрее при $k > 1$, медленнее при $0 < k < 1$, а при $k < 0$ частицы роя неуправляемо разлетаются.

3.3. Модель формирования скоплений за счёт реконфигурации параметров модели.

Одним из важных практических приложений является метод «возврата параметров модели», при котором в процессе выполнения миссии геометрия скоплений меняется многократно. Его особенность состоит в том, что на заданной i -й итерации все коэффициенты $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x, \dots, \gamma_z$ меняются на другие, а через некоторое время (условно измеряемое количеством итераций) они возвращаются к исходным. Такой вариант, в принципе, должен создавать максимальную неопределённость для внешнего Наблюдателя.

Действительно, метод «возврата параметров» позволяет в процессе выполнения миссии менять структуру скопления. Так, первоначально случайное распределённое в пространстве скопление к 500-й итерации формируется как два скопления примерно одинакового объёма и плотности, а к 600-й итерации после смены коэффициентов сжимается и переходит в одну плоскость. Задавая другие коэффициенты из исходной при тех же условиях смены коэффициентов (500, 600 итераций) итерации, можно получить и другую геометрию скопления.

4. Анализ результатов конфликта Создатель роя — внешний Наблюдатель.

Пусть объект скопления представляет собой маленький шарик радиусом $r = 0,04$ м. Известно, что ЭПР шара $\delta = \pi r^2$. Таким образом, ЭПР объекта $\delta_n = 0,005$ м². Такая ЭПР соизмерима с ЭПР небольшой птицы [7]. Предполагая, что расстояния между объектами в скоплении соизмеримы с размерами самих объектов, для плотных скоплений из N объектов

можно считать, что ЭПР =
$$\sum_{n=1}^N \delta_n.$$

На рис. 1, *a* скопление рассеянное, расчёт суммарной ЭПР затруднителен и оснований для принятия решений у Наблюдателя нет. Слежение за скоплением просто продолжается.

На рис 1, *b* скопление имеет вид эллипсоида, но по-прежнему рассеянное. Суммарная ЭПР имеет большое значение (сравнима с ЭПР самолёта-истребителя), но она противоречит экспертному знанию о том, что рой настолько значителен, что не может быть единой фигурой. Решение не принимается.

На рис. 1, *c* ситуация аналогичная. Общая ЭПР значительна, пространственно-временное скопление имеет иной вид, но наблюдаемое скопление не производит впечатление единого объекта. Рой снова настолько неоднозначно распределён по пространству, что принять решение затруднительно.

На рис. 1, *d* РЛС фиксирует плотный пространственный эллипсоид. Величина ЭПР_{РЛС} может меняться в зависимости от взаимного расположения РЛС и эллипсоида, а также его размеров. Тем не менее при почти полном охвате зоной ответственности РЛС всего скопления как плотного эллипсоида можно создать ситуацию, когда ЭПР_{РЛС} превысит значение 0,5, что также будет близко к характеристикам самолётов. Заметим, что данные оценки получены только для 100 объектов в скоплении. При 200 объектах эллипсоидальное скопление в зоне ответственности РЛС будет уже имитировать головную

часть оперативно-тактической ракеты ЭПР приблизительно $0,15-1,6$ [7]. Создателю роя целесообразно собрать такой рой из крайне дешёвых, но «ложных» объектов.

На рис. 1, f рой разделяется примерно на два одинаковых роя. Такое разроение вносит максимальную неопределённость в прогнозе дальнейшего поведения группы. Радиолокационная станция разделяет общую группу на две, но расчёт ЭПР по каждой группе затруднителен в силу их слабой плотности.

На рис. 1, e плотная совокупность в виде плоской линии, состоящей из более чем 70 из 100 объектов, попадает в область ответственности РЛС. Суммарная $ЭПР_{РЛС} \sim 0,365$. Такое скопление РЛС воспринимает как малозаметный истребитель ($0,3 \leq 0,365 \leq 0,4$). Однако фиксация факта, что такой истребитель имеет крайне небольшую длину (около 3 м), заставляет воспринимать наблюдаемое скопление как небольшой беспилотник (так, израильский БЛА «Нагор» имеет длину около 2,5 м [8]). Вместе с тем отсутствие у него требуемой ширины (не менее 3 м), как представляется, не позволяет достоверно идентифицировать наблюдаемый объект.

Заключение. В теории принятия решений поведение всегда предполагается рациональным. Вместе с тем в практических задачах выполнения коллективных миссий значительными группами объектов управления сравнительно небольших размеров, особенно в условиях антагонистической среды, могут возникать задачи, требующие иррационального поведения одного или нескольких объектов, чаще всей группы.

Стратегия поведения таких скоплений, первоначально образуемых в виде роя одинаковых объектов, формируется как построение изменяющейся во времени его пространственно-временной структуры с потенциально разнообразной геометрической формой, плотностью распределения и скоростью перемещения объектов скоплений. Простое скопление (простой рой) формируется из объектов, каждый из которых обучен в парадигме трёх правил: выравнивание скоростей с целью одновременного совместного перемещения, «отталкивание» для обеспечения «нестолкновения» и «притяжения» к лучшей точке для соблюдения формы роя. Стратегия поведения такого простого роя вырабатывается заранее; форма и плотность роя в процессе выполнения им задач существенно не меняются.

Сформулирована рабочая гипотеза о том, что за счёт варьирования количеством объектов, плотностью роя и скоростью его перемещения возможно сформировать различные вариации геометрических форм роевого скопления и потенциально создать ситуации, при которых рой будет восприниматься внешним Наблюдателем как единый, отличающийся от исходного крупный объект с критической ЭПР, что заставит внешнего Наблюдателя принимать ошибочные решения.

Указанная гипотеза подтверждена математическим моделированием конфликтных ситуаций «Скопление против РЛС». В качестве основы математического моделирования движения роя была использована модель К. Рейнольдса. Для исследования возможностей образования скоплений модель была дополнена специальными коэффициентами, которые могут изменяться в заданных пределах.

Предложены и исследованы три метода создания пространственно-временных скоплений: а) метод вариаций параметров со случайным подбором коэффициентов модели, б) метод переменных параметров с их изменением по линейному закону и в) метод возврата параметров с реконфигурацией (последующим возвратом) к исходным.

Установлено, что изменением коэффициентов в доработанной модели роевого движения К. Рейнольдса возможно создавать различные пространственно-временные формации, близкие к таким геометрическим и пространственным фигурам, как ограниченная линия, прямоугольник, шар, параллелепипед, диск, цилиндр, эллипс и др. Кроме того, возникает возможность варьировать также временем выхода скопления в заданную точку пространства.

К сожалению, геометрия всех создаваемых скоплений выражена не очень чётко. Не менее 15–20 % объектов выходят за пределы обличий формируемых геометрических фигур. Не исключено, что указанное связано с тем, что первоначальная структура (на нулевой итерации) формируется как хаотическая, случайно размещённая в пространстве. Однако и в этих условиях потенциально возможно существенно изменять ЭПР вновь образуемых скоплений: как увеличивать её значение, так и уменьшать. Так что внешний Наблюдатель, фиксирующий ЭПР радиолокационной станцией, может воспринимать скопление сначала как хаотическое, а затем как угрожающий объект, что в ряде случаев является задачей, которая ставится перед Создателем скопления.

Все коэффициенты исследуемой модели имеют достаточно понятный смысл, место и роль в образовании роя. Вместе с тем, к сожалению, установить соответствующие закономерности образования заданной геометрии скоплений на данном этапе исследования не удастся. Реализация всех трёх методов осуществлялась в основном случайным подбором параметров для получения геометрических фигур скоплений, что потребовало значительных трудозатрат. Такое решение не является уникальным; почти все природные алгоритмы включают эмпирические, так называемые «настроечные» коэффициенты для учёта особенностей их реализации. Однако на данном этапе исследования подтверждена принципиальная возможность создания своего рода «хаотических» скоплений с их нецеленаправленными вариациями, но имитацией целенаправленной деятельности для внешнего Наблюдателя.

Существует ещё один аспект эффективности предлагаемого подхода. В последнее время в задачах обнаружения объектов интереса активно используются методы машинного обучения. Так, например, в работе [9] подчёркивается, что при решении задач обнаружения и классификации объектов по их изображениям за счёт применения нейросетевых технологий можно существенно повысить точность классификации. Создание неопределённых для Наблюдателя пространственно-временных скоплений существенно затрудняет построение обучающих выборок для машинного обучения нейросетей, решающих задачи обнаружения и идентификации наблюдаемых целей.

В данной работе исследовались возможности создания пространственно-временных формаций скоплением гомогенных объектов. В процессе дальнейших исследований целесообразно рассмотреть аналогичные ситуации при включении в состав скопления гетерогенных объектов различного вида и назначения, в том числе ложных, специально предназначенных для введения внешнего Наблюдателя в заблуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абросимов В. К.** Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. М.: Издательский дом Наука, 2017. 304 с.
2. **Словарь** русского языка: В 4-х т. / РАН, Ин-т лингвистич. исследований; под ред. А. П. Евгеньевой. 4-е изд., стер. М.: Рус. яз.; Полиграфресурсы, 1999.
3. **Шпигарь Н., Олейник А., Спичак Е.** Обнаружение и подавление БпЛА // Арсенал Отечества. 2021. № 1 (51). С. 18–23.
4. **Craig Reynolds** Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. 1987. 21 (4). P. 25–34.
5. **Водолазский И. А., Егоров А. С., Краснов А. В.** Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации // Молодой учёный. 2017. № 4. С. 147–153.
6. **Abrosimov V., Mazurov A.** Irrational behavior strategies for small robot's swarm // Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta, Prikladnaya Matematika, Informatika, Protsessy Upravleniya. 2021. 17, N 4. P. 419–432.

7. **Ботов М. И., Вяхирев В. А.** Основы теории радиолокационных систем и комплексов: учеб. /Под общ. ред. М. И. Ботова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 530 с.
8. **Соколов Н. А., Рябухин Д. А.** К проблеме противодействия беспилотным летательным аппаратам в условиях ограниченных ресурсов. Опыт Карабаха // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2022. №1 (225). С. 17–22.
9. **Борзов С. М., Нежевенко Е. С.** Нейросетевые технологии в задачах обнаружения и классификации объектов // Автометрия. 2023. **59**, № 3. С. 52–71. DOI: 10.15372/AUT20230307.

Поступила в редакцию 22.05.2023

После доработки 22.05.2023

Принята к публикации 22.06.2023
