

УДК 621.396.969

Н.В. Лучков, Н.А. Пчелин

**ГРУППИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

**Лучков Николай Владимирович**, кандидат технических наук. Окончил радиотехнический факультет и аспирантуру на кафедре «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Ведущий инженер-исследователь ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: nik-lnv@mail.ru].

**Пчелин Никита Александрович**, окончил Ульяновское высшее военно-командное училище связи. Главный конструктор ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: pna3@yandex.ru].

## Аннотация

Представлен обзор основных принципов укрупнения (группирования) отметок объектов радиолокационного наблюдения, используемых в тех пунктах обработки, где не требуется информация по каждому объекту или же плотность поступления отметок от объектов оказывается выше рассчитанной пропускной способности.

Предложен алгоритм группирования объектов, основанный на совместном использовании эвристического подхода и показателя качества, позволяющий в автоматическом режиме совместно обрабатывать данные о координатах и о скорости объектов. Важным дополнительным результатом является возможность увеличения количества учитываемых характеристик объектов при первичном группировании. Продемонстрирован пример работы предлагаемого способа группирования объектов с заданными значениями координат и скоростей.

Ключевые слова: группирование, третичная обработка, эвристический подход, евклидово расстояние, радиолокационные отметки.

**OBJECT GROUPING BASED ON RADAR OBSERVATIONS**

**Nikolay Vladimirovich Luchkov**, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering and completed his post-graduation at the Department of Telecommunications of Ulyanovsk State Technical University; Research Engineer at Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company Research-and-Production Association Mars; author of articles in the field of statistic methods in signal processing. e-mail: nik-lnv@mail.ru.

**Nikita Aleksandrovich Pchelin**, graduated from the Ulyanovsk High Education Military Communications Academy, Chief Designer at FRPC OJSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of statistic methods in signal processing. e-mail: pna3@yandex.ru.

## Abstract

The article presents a review of main principles of integration (grouping) of the radar-tracking observation object marks used in those processing points where the information on each object is not required or the density of mark reception from objects appears above the calculated throughput.

The article offers an algorithm for object grouping based on joint use of the heuristic approach and the quality index allowing an automatic joint processing of data about the object coordinates and speed. An important outcome is an opportunity to increase the relevant object characteristics at initial grouping. The article shows an example of performance of the proposed method for grouping objects with the set coordinates and speed values.

Key words: grouping, tertiary processing, heuristic method, Euclidean distance, radar marks.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важнейших задач современной радиолокации является объединение информации об объектах, полученных от нескольких радиолокационных станций (РЛС), и создание общей картины воздушной обстановки [1–8]. Анализ радиолокационной информации, поступаю-

щей от нескольких источников, обычно называют третичной обработкой информации. Одной из ее задач является укрупнение информации.

Укрупнение (группирование) отметок объектов проводится в тех пунктах обработки, где не требуется информация по каждому объекту или же темп поступления отметок от объектов оказывается выше рассчитанной пропускной

способности. Обычно группирование производится на высших инстанциях системы управления. Группирование осуществляется по признаку близости координатных описаний группируемых объектов и включает в себя следующие основные этапы [1–8]:

1. Выделение компактных групп объектов на основе близости координат  $x, y, z$ .
2. Селекция внутри выделенных групп по скорости.
3. Определение характеристик укрупненного объекта.
4. Корректировка решения оператора.
5. Сопровождение укрупненного объекта.

Содержание этапов свидетельствует об их важности и необходимости для создания полной картины о воздушной обстановке. Поэтому рассмотрение данных видов обработки радиолокационной информации является актуальным.

Известно множество подходов к решению задачи объединения данных разнородных РЛС. Решение задачи байесовского одновременного обнаружения (различения) и оценивания параметров сигналов на фоне помех обычно конкретизируется для аддитивных или мультипликативных комбинаций стоимостей ошибок различения с квадратичными функциями потерь при оценивании [5]. Вместе с тем при синтезе ряда информационных систем отсутствуют удовлетворительные решения задачи укрупнения отметок от объектов на основе совместного использования эвристического подхода и показателя качества. Использование эвристического подхода позволяет включать набор специфических процедур, разработанных применительно к конкретным задачам, обеспечивая, таким образом, более эффективное их решение. В данной работе предлагается алгоритм группирования, позволяющий совместно обрабатывать данные о координатах и о скорости объектов.

### АЛГОРИТМ ГРУППИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Вначале следует задать набор  $N_c$  исходных центров групп  $\{z_1, z_2, \dots, z_{N_c}\}$ . При группировании  $N$  отметок  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  необходимо выполнить следующие основные шаги.

Шаг 1. Задаются параметры, определяющие процесс группирования:  $K$  – необходимое число кластеров;  $\theta_N$  – минимальное число отметок в одной группе;  $\theta_s$  – максимальное значение среднеквадратичного отклонения (СКО);  $\theta_c$  – минимальное расстояние между кластерами;  $L$  – максимальное количество пар центров кластеров, которые можно объединить;  $dV$  – допустимое значение дисперсии скорости движения отметок объектов;  $I$  – допустимое число циклов итерации.

Шаг 2. Отметки  $\{x_j\}$  распределяются по группам, соответствующим выбранным исходным центрам, по правилу  $\|x - z_j\| < \|x - z_i\|, i = 1, 2, \dots, N_c; i \neq j$ .

Шаг 3. Ликвидируются подмножества, в состав которых входит менее  $\theta_N$  отметок; при этом значение  $N_c$

уменьшается на 1 и осуществляется переход к шагу 2, иначе переходим к следующему шагу.

Шаг 4. Каждый центр группы  $\{z_j\}$  локализуется и корректируется посредством приравнивания его выборочному среднему, найденному по соответствующему подмножеству  $S_j$ :

$$z_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} x, j = 1, 2, \dots, N_c,$$

где  $N_j$  – число объектов, вошедших в подмножество  $S_j$ .

Шаг 5. Вычисляется среднее расстояние  $\bar{D}_j$  между объектами, входящими в подмножество  $S_j$ , и соответствующим центром группы:

$$\bar{D}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} \|x - z_j\|, j = 1, 2, \dots, N_c.$$

Шаг 6. Вычисляется обобщенное среднее расстояние между объектами, находящимися в отдельных кластерах, и соответствующими центрами групп:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_c} N_j \bar{D}_j.$$

Шаг 7. Если текущий цикл итерации – последний, то задается  $\theta_c = 0$  и осуществляется переход к шагу 11. Если  $N_c \leq K/2$ , то переход к шагу 8. Если текущий цикл итерации имеет четный порядковый номер или выполняется условие  $N_c \geq 2K$ , то переход к шагу 11; в противном случае процесс итерации продолжается.

Шаг 8. Для каждой группы вычисляется СКО:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} (x_{ik} - z_{ij})^2},$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_c,$$

где  $n$  – размерность образа отметок. Каждая компонента  $\sigma_j, j = 1, 2, \dots, N_c$ , характеризует СКО отметки, входящей в подмножество  $S_j$ , по одной из главных осей координат.

Шаг 9. Среди всех векторов СКО  $\sigma_j, j = 1, 2, \dots, N_c$ , отыскивается максимальная компонента  $\sigma_{jmax}$ .

Шаг 10. Если  $\sigma_{jmax} > \theta_s, \bar{D}_j > \bar{D}$  и  $N_j > 2(\theta_N + 1)$  или  $N_c \leq K/2$ , то группа с центром  $z_j$  расщепляется на две новые группы с центрами  $z_j^+$  и  $z_j^-$ , кластер с центром  $z_j$  ликвидируется, а значение  $N_c$  увеличивается на 1. Для определения центра кластера  $z_j^+$  к компоненте вектора  $z_j$  соответствующей максимальной компоненте вектора  $\sigma_j$  прибавляется заданная величина  $\lambda$ ; центр кластера  $z_j^-$  определяется вычитанием этой же величины  $\lambda$  из той же самой компоненты вектора  $z_j$ . В качестве величины  $\lambda$  можно выбрать значение  $\sigma_{jmax}$ . Если на этом этапе происходит расщепление, надо перейти к шагу 2, в противном случае продолжить выполнение алгоритма.

Шаг 11. Вычисляются расстояния  $D_{ij}$  между всеми парами центров групп:

$$D_{ij} = \|z_i - z_j\|, \quad i = 1, 2, \dots, N_c - 1, \quad j = i + 1, \dots, N_c.$$

Шаг 12. Расстояния  $D_{ij}$  сравниваются с параметром  $\theta_c$ . Если все  $D_{ij} > \theta_c$ , то переходим к шагу 14, иначе те  $L$  расстояний, которые оказались меньше  $\theta_c$ , ранжируются в порядке возрастания, причем  $D_{i_1j_1} < D_{i_2j_2} < \dots < D_{i_Lj_L}$ , и продолжаем работу алгоритма.

Шаг 13. Применяется процедура слияния к парам групп с центрами  $z_{i_l}$  и  $z_{j_l}$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ . Новый центр группы определяется по формуле:

$$z_l^* = \frac{1}{N_{i_l} + N_{j_l}} [N_{i_l}(z_{i_l}) + N_{j_l}(z_{j_l})].$$

Центры групп  $z_{i_l}$  и  $z_{j_l}$  ликвидируются, и значение  $N_c$  уменьшается на 1. Если на этом этапе происходит слияние, надо перейти к шагу 2, в противном случае продолжить выполнение алгоритма.

Шаг 14. Вычисляется среднее значение скорости  $\bar{V}_j$  между объектами, входящими в подмножество  $S_j$  и соответствующим центром группы:

$$\bar{V}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} V_x, \quad j = 1, 2, \dots, N_c,$$

где  $N_j$  – число объектов, вошедших в группу  $S_j$ ;  
 $V_x$  – скорость объекта  $x$ ,  $x \in S_j$ .

Шаг 15. В каждой группе  $S_j$  определяется объект с наиболее близким значением скорости к соответствующему среднему значению  $\bar{V}_j$ , вычисленному на шаге 14. Далее выделенный объект назначается центром группы  $S_j$  со средним значением скорости, равным скорости данного объекта.

Шаг 16. Определяется вектор  $d\bar{V}_{ij}$  характеризующий дисперсию значений скорости каждой отметки относительно средней скорости  $\bar{V}_j$  соответствующей группы  $S_j$ :

$$d\bar{V}_{ij} = (\bar{V}_{x_i} - \bar{V}_j)^T (\bar{V}_{x_i} - \bar{V}_j),$$

$$x_i \in S_j, \quad i = 1, \dots, N_j, \quad j = 1, \dots, N_c.$$

Шаг 17. Значения  $d\bar{V}_{ij}$  сравниваются с параметром  $dV$ . Если  $d\bar{V}_{ij} > dV$  и  $N_j > 2\theta_{N_j}$  то группа  $S_j$  разделяется, значение  $N_c$  увеличивается на 1. Разделение группы на данном шаге может быть проведено только один раз, включив в новые отметки из  $S_j$ , для которых  $d\bar{V}_{ij} > dV$ , при этом из группы  $S_j$  они исключаются.

Если на этом этапе происходит расщепление, надо перейти к шагу 14, в противном случае работа алгоритма продолжается.

Шаг 18. Если текущий цикл итерации – последний, то выполнение алгоритма прекращается. В противном случае следует возвратиться либо к шагу 1, если по предписанию оператора меняется какой-либо из параметров, определяющих процесс кластеризации, либо к шагу 2, если в очередном цикле итерации параметры процесса должны остаться неизменными. Завершением цикла итерации считается каждый переход к шагам 1 или 2.

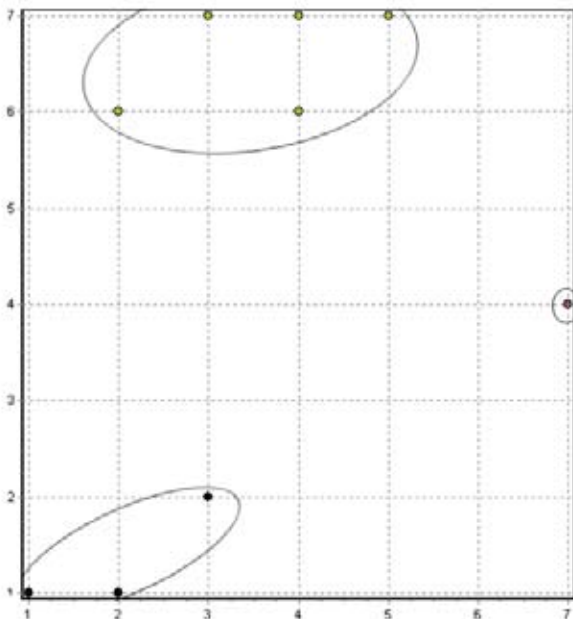


Рис. 1. Выборка отметок с использованием группирования по координатам для параметров  $\theta_s = 2$ ,  $\theta_c = 2$  (шаги 1–14)

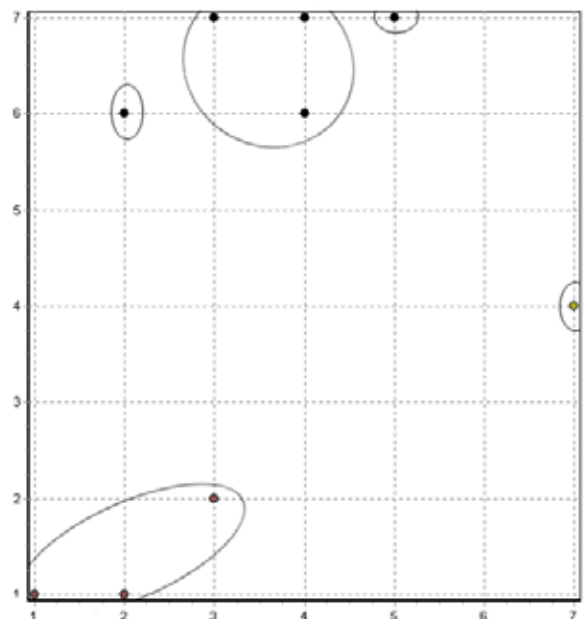


Рис. 2. Комбинированное группирование отметок для параметров  $\theta_s = 2$ ,  $\theta_c = 2$ ,  $dV = 0,03$  (шаги 1–18)

### ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА ГРУППИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Предложенный способ группирования отметок объектов реализован в среде программирования Delphi 7 и апробирован для различных значений параметров отметок. На рисунках 1 и 2 представлены примеры реализации предложенного способа выделения компактных групп отметок с заданными значениями координат и скоростей. Значения скоростей заданы из расчета, что внутри одной группы на рисунке 1 каждое последующее значение больше предыдущего на 0,1. При этом минимальное значение скорости в каждой следующей группе увеличивается на 1.

Как следует из рисунка 1, с помощью предложенного алгоритма выделено 5 групп отметок, что соответствует их интуитивному разделению по близости расстояний между ними. На рисунке 2 показаны результаты комплексной обработки информации об объектах, где использовались критерии близости как координат отметок, так и их скоростей.

Работа предложенного алгоритма может быть ускорена за счет использования информации после каждого цикла итерационного процесса, так, например, могут корректироваться максимальное значение СКО, минимальное расстояние между кластерами, минимальное число отметок в одной группе или максимальное количество итераций.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм отыскания групп основан на совместном использовании эвристического подхода и показателя качества. Анализ результатов показывает, что комплексная обработка параметров отметок от объектов наблюдения позволяет в автоматическом режиме получить их разделение на группы с заданными показателями качества и совпадающие с интуитивным решением задачи группирования. При этом совместно используются проекции на оси координат (в прямоугольной или полярной) и параметры скорости соответствующих объектов. Важным дополнительным результатом является возможность увеличения количества учитываемых характеристик объектов при первичном группировании, что может быть использовано системами автоматического управления в процессе третичной обработки для выполнения укрупнения данных об объектах, сходных между собой по всей имеющейся о них информации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. – М. : Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М. : Советское радио, 1975.
3. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов – М. : Мир – 1978 – 416 с.

4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

5. Создание мобильной многопозиционной радиолокационной системы на основе канала связи РТК-2 и современных методов обработки радиолокационной информации / Н.В. Лучков [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 4 (30). – С. 34–39.

6. Кондратьев В.С., Козлов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. проф. В.В. Цветнова. – М. : Радио и связь, 1986. – 264 с.

7. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. – Минск : НВИЗРУ ПВО, 1990.

8. Радиолокационное оборудование автоматизированных систем управления воздушным движением : учеб. для вузов / А.А. Кузнецов [и др.] / под ред. А.А. Кузнецова – М. : Транспорт, 1995.

### REFERENCES

1. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnyye sistemy: uchebnik dlya vuzov* [Radar System: Higher Education Textbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004.

2. Belotserkovskiy G.B. *Osnovy radiolokatsii i radiolokatsionnyye ustroystva* [Framework of Radiolocation and Radar]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1975.

3. Tou J.T., Gonzalez R.C. *Printsipy raspoznavaniya obrazov* [Pattern Recognition Principles]. Moscow, Mir Publ., 1978. 416 p.

4. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 1072 p.

5. Luchkov N.V. and Others. *Sozdaniye mobilnoy mnogopozitsionnoy radiolokatsionnoy sistemy na osnove kanala svyazi RTK-2 i sovremennykh metodov obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Creation of Mobile Multi-Position Radar System Based on Communications Channel Rtk-2 and Modern Methods of Radar Information Processing]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2012, no. 4 (30), pp. 34–39.

6. Kondratev V.S., Kozlov A.F., Markov L.N. *Mnogopozitsionnyye radiotekhnicheskiye sistemy, pod red. prof. V.V. Tsvetnova* [Multipositional Radio Systems, under the editorship of Prof. V.V. Tsvetnov]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986. 264 p.

7. Okhrimenko A.E. *Osnovy obrabotki i peredachi informatsii* [Data Processing and Transmission]. Minsk, NVIZRU PVO Publ., 1990.

8. Kuznetsov A.A. and Others. *Radiolokatsionnoye oborudovaniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya vozdushnym dvizheniyem : ucheb. dlya vuzov pod red. A.A. Kuznetsova* [Radar Equipment for Computer-Aided Air Traffic Control Systems: Higher Education Textbook under the Editorship of A.A. Kuznetsov]. Moscow, Transport Publ., 1995.