

## Система управления антенной решеткой с совмещением жесткой и гибкой программ обзора

Л.В. Винник , С.Е. Мищенко 

ФНПЦ «ФГУП «РНИИРС»  
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Нансена, 130

**Аннотация** – Предложена структура системы управления антенной решеткой с совмещением жесткой и гибкой программ обзора, отличающаяся введением дополнительных модулей статистики и экспертных оценок в цепи обратной связи между модулем вторичной обработки и аппаратно-программными комплексами формирования передающей и приемных диаграмм направленности антенной решетки. Реализация данной структуры позволяет обеспечить формирование дополнительного передающего и нескольких приемных лучей для подтверждения отметок, которые не удовлетворяют заданному критерию обнаружения. Разработан алгоритм управления антенной решеткой, отличающийся процедурой дополнительного подтверждения отметок с низким уровнем отношения сигнал/шум за счет формирования дополнительных передающего и приемных лучей. Получены оценки выигрыша от реализации предложенных структуры системы управления антенной решеткой и алгоритма ее функционирования.

**Ключевые слова** – антенная решетка; система управления; способ обзора; смешанный обзор пространства; жесткая программа обзора; гибкая программа обзора.

### Введение

В большинстве случаев задачу обнаружения и сопровождения целей решают в ходе реализации жесткой программы последовательного или смешанного обзора пространства [1]. При реализации смешанного обзора пространства антенную систему устанавливают на опорно-поворотном устройстве, которое обеспечивает механическое сканирование в азимутальной плоскости, в режиме излучения формируют диаграмму направленности (ДН) специальной формы, перекрывающую зону обнаружения в угломестной плоскости и распределяют вдоль этой зоны веер приемных лучей [2–4]. Расширение луча в угломестной плоскости приводит к потерям усиления антенны относительно максимального значения, что является платой за возможность одновременного обзора в угломестной плоскости. При этом задача обнаружения и сопровождения объектов в радиолокации затрудняется тем, что уровень отношения сигнал/шум (ОСШ) в ряде случаев может оказаться ниже порогового уровня. При этом отметки, не удовлетворяющие критерию обнаружения по уровню ОСШ, просто отбраковываются.

В работе [5] был предложен способ обзора пространства, при котором жесткая программа смешанного обзора пространства совмещалась с дополнительным режимом обзора. Известно [6], что существуют зоны обнаружения, которые характеризуются изменением дальности до границы зоны

обнаружения от максимального к минимальному значению вдоль угломестной координаты. При использовании режима обзора с однозначным изменением дальности время ожидания эхо-сигналов с различных угломестных направлений является неодинаковым. Это позволяет использовать часть «освободившихся» приемных лучей для дополнительного обзора пространства. При этом требуется излучение дополнительного зондирующего импульса в новом азимутальном направлении. В работе [5] отсутствуют рекомендации по выбору параметров дополнительной программы обзора. В связи с этим представляется актуальной задача разработки структуры системы управления антенной решеткой с совмещением жесткой и гибкой программ обзора, алгоритма функционирования такой системы и оценки ее потенциальной эффективности.

Цель статьи состоит в обнаружении малозаметных объектов за счет совмещения жесткой программы смешанного обзора с гибкой программой обзора пространства.

### 1. Разработка структуры системы управления антенной решеткой

В настоящее время в качестве антенн, реализующих параллельный обзор пространства, используют приемно-передающие антенные решетки (АР). В работах [7; 8] была предложена система последовательного обзора, которая реализовала гибкую

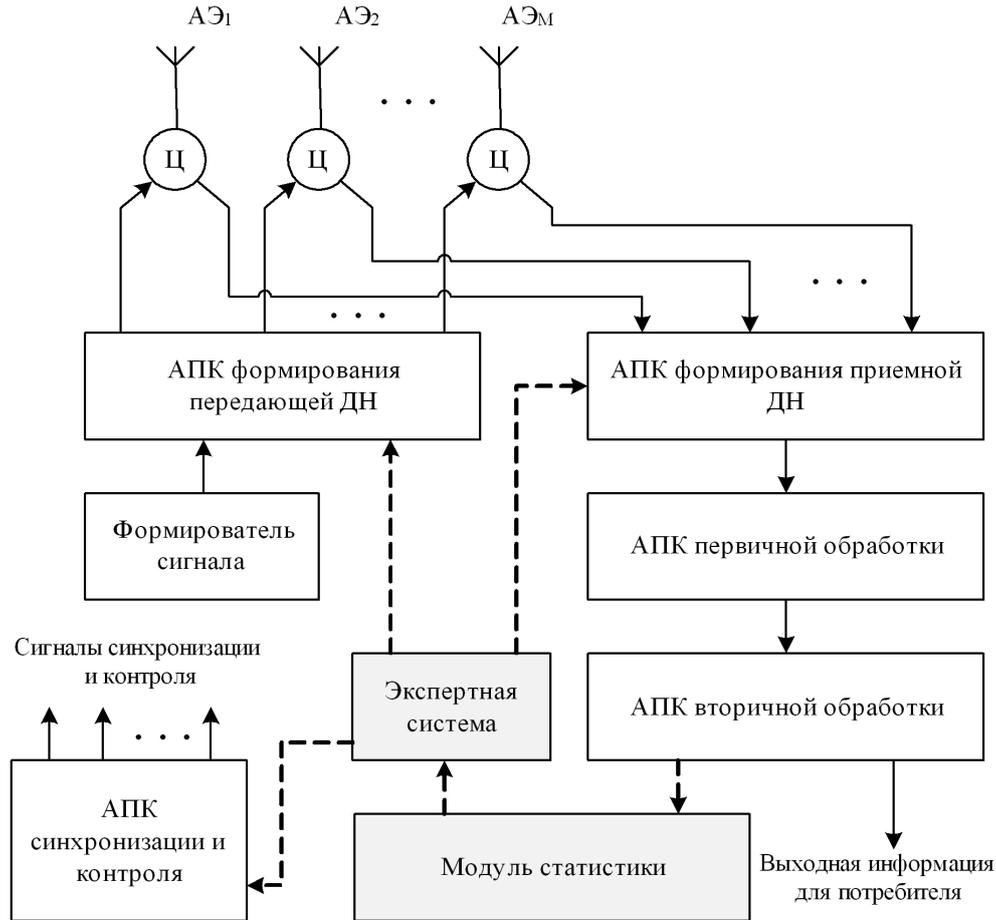


Рис. 1. Предлагаемая структура системы управления АР  
Fig. 1. Proposed structure of the AR management system

программу обзора пространства на основе рекомендаций системы экспертных оценок. Наличие системы экспертных оценок позволяет оценить время излучения нового зондирующего импульса и пространственную ориентацию передающего и приемных лучей АР. Входными данными для системы экспертных оценок являются: траектории и классы распознанных объектов. В этом случае излучение и позиционирование лучей устанавливаются в соответствии с приоритетом сопровождаемых целей.

Следуя работам [7; 8], в систему управления АР должны быть включены экспертная система, модуль статистики, а также модули первичной и вторичной обработки сигналов, которые позволяют выделить информацию о пространственной ориентации отметок, строят траекторию и идентифицируют класс целей.

Управление программой обзора и формированием передающей и приемных ДН осуществляет аппаратно-программный комплекс (АПК) синхронизации и контроля, сигналы которого поступают на входы всех элементов системы управления АР [9].

Пространственное управление формируемыми ДН реализует АПК формирования передающей ДН и АПК формирования приемных ДН. В связи с этим выходные сигналы экспертной системы должны быть связаны с соответствующими входами АПК синхронизации и контроля, АПК формирования передающей и приемных ДН.

В результате можно заключить, что система управления АР должна иметь структуру, приведенную на рис. 1. На данном рисунке серым цветом выделены модули, которые должны быть добавлены в систему управления АР, а штриховыми линиями – новые связи.

Несложно заметить, что предлагаемая структура интегрирует в систему управления АР все основные элементы радиолокационной системы, что отражает общую современную тенденцию интегрирования антенны в систему обработки сигналов и отличает от структуры РЛС предыдущих поколений, приведенной, например, в [10].

В предлагаемой структуре особенно важное значение приобретает АПК вторичной обработки, в котором решают задачи прогнозирования поло-

жений целей и их распознавания. Класс объекта играет определяющую роль при выставлении приоритетов для выбора интересующих целей дополнительными лучами по гибкой программе обзора.

## 2. Разработка алгоритма управления АР и оценка его эффективности

Рассмотрим алгоритм управления АР, отвечающий структуре на рис. 1.

В соответствии со способом обзора пространства [5] время излучения дополнительного луча должно быть выбрано из условий:

- достаточного числа «свободных» приемных лучей, ориентированных в пространственную область с минимальной дальностью до границы зоны обнаружения. Как показали оценки, приведенные в [5], это условие выполнимо после того, как время ожидания эхо-сигналов превышает  $0,3...0,5T$ , где  $T$  – период следования зондирующих импульсов, выбранный из условия однозначного определения максимальной инструментальной дальности системы;

- наличия в предыдущем обзоре интервала времени, соизмеримого с длиной зондирующего импульса, свободного от радиолокационных отметок по соответствующей дальности или с минимальным числом отметок;

- с учетом необходимого времени для приема отраженных сигналов от целей.

После определения момента времени излучения дополнительного зондирующего импульса осуществляют прогнозирование углового положения интересующей обнаруживаемой цели наиболее высокого приоритета и выбирают азимутальное и угломестное положение максимума дополнительного передающего луча, а также его ширину в азимутальном и угломестном направлениях, распределяют приемные лучи вдоль дополнительного передающего луча.

Как правило, число приемных лучей современных АР ограничено пропускной способностью линий связи с последовательной передачей данных, используемых в системе цифрового диаграммообразования [11]. В связи с этим число свободных приемных лучей всегда будет меньше, чем доступное число приемных лучей АР. Это означает, что дополнительный передающий луч АР должен иметь меньшие угловые размеры, чем луч, используемый для реализации жесткой программы смешанного обзора пространства. Это позволяет увеличить плотность потока мощности у цели и

улучшить вероятностные показатели обнаружения (вероятности правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги).

Излучение дополнительного зондирующего луча осуществляют, подбирая момент времени, удовлетворяющий сформулированным выше условиям.

При наличии всех необходимых данных жесткая программа обзора дополняется гибкой программой.

На рис. 2 приведен алгоритм реализации гибкой программы обзора для обнаружения малозаметных целей.

В соответствии с предложенным алгоритмом к существующей системе управления АР предъявляются требования к дополнительной установке передающего и приемных лучей на основе пороговой обработки. В соответствии со структурой на рис. 1 пороговая обработка может быть также совмещена с разделением объектов на классы и формированием траекторий, т. е. после реализации вторичной обработки сигналов. Это означает, что на рис. 2 предложен наиболее простой алгоритм обнаружения малозаметных целей, отвечающий структуре системы управления АР на рис. 1.

Рассмотрим пример реализации предлагаемого алгоритма управления АР при совмещении жесткой и гибкой программ обзора [5]. Пусть дальность действия системы составляет 200 км, а максимальная высота полета обнаруживаемой цели – 20 км. По углу места протяженность зоны обнаружения составляет  $60^\circ$ . Для приема сигналов система использует  $N = 21$  приемных лучей с шириной луча по углу места и  $\Delta_\phi = 2^\circ$  – по азимуту. В таблице приведены дальности действия РЛС в точках пересечения соседних приемных лучей и продолжительность использования лучей для реализации жесткой программы обзора.

Для реализации гибкой программы обзора необходимо дождаться «освобождения» хотя бы четырех приемных лучей. Как видно из таблицы, лучи с номерами 18...21 освобождаются после 0,171 мс. Это означает, что оставшееся время ожидания эхо-сигналов составляет  $1,333 - 0,171 = 1,162$  мс и позволяет обеспечить обнаружение целей на максимальном расстоянии порядка 174 км.

Максимальное значение коэффициента направленного действия (КНД) АР, на примере которой моделировались энергетические характеристики системы обнаружения, было равно 37,9 дБ, а при формировании ДН специальной формы – 35 дБ. Снижение КНД при формировании ДН специ-



Рис. 2. Алгоритм управления АР, совмещающий жесткую программу смешанного обзора с гибкой программой обзора для отобранных целей

Fig. 2. AR control algorithm combining a rigid mixed survey program with a flexible survey program for selected targets

альной формы для передающей АР соответствует уменьшению излучаемой мощности. В результате при подтверждении отметки цели выигрыш в плотности потока мощности зондирующего сигнала у цели может составлять 6 дБ и более в зависимости от угломестной координаты ориентации дополнительного луча.

Таблица. Оценка продолжительности использования лучей для реализации жесткой программы обзора  
Table. Estimation of the duration of the use of beams for the implementation of a rigid survey program

№ луча	$\theta_0$ , град	$R(\theta)$ , км	$t_{wait}$ мс
1	0	200	1,333
2	3	200	1,333
3	6	169,95	1,133
4	9	120,74	0,805
5	12	93,08	0,621
6	15	75,65	0,504
7	18	63,79	0,425
8	21	55,23	0,368
9	24	48,79	0,325
10	27	42,37	0,283
11	30	39,81	0,265
12	33	36,59	0,243
13	36	33,93	0,226
14	39	31,71	0,211
15	42	29,83	0,199
16	45	28,24	0,188
17	48	26,88	0,179
18	51	25,71	0,171
19	54	24,70	0,165
20	57	23,83	0,159
21	60	23,10	0,154

Снижение ОСШ в измерительном канале влияет на вероятностные показатели обнаружения. Например, если заданы вероятность правильного обнаружения 0,99 и вероятность ложной тревоги  $10^{-5}$ , то по формуле Альберштейма [12] пороговое значение ОСШ составляет 13,9 дБ. Совмещение жесткой и гибкой программ обзора позволяет в канале жесткой программы снизить пороговое значение ОСШ на 6 дБ, а при реализации гибкой программы обзора осуществлять подтверждение обнаруженных целей с пороговым значением ОСШ, обеспечивающим заданные вероятностные характеристики обнаружения.

Следовательно, реализация разработанных структуры системы управления АР с системой экспертных оценок и алгоритма ее функционирования с совмещением жесткой и гибкой программ обзора дает возможность повысить энергетические характеристики дополнительного луча по крайней мере на 6 дБ и существенно увеличить вероятность обнаружения малозаметных целей,

которые при реализации жесткой программы обзора обычно могут отбраковываться.

### Заключение

1. Разработанная структура системы управления АР отличается включением модулей статистики и системы экспертных оценок в цепь обратной связи обработки сигналов, а также дополнительными связями данных модулей с системой управления передающего и приемных лучей АР.

2. Разработанный алгоритм управления АР отличается наличием дополнительных операций для

подтверждения отметок с низким уровнем ОСШ после пороговой проверки и опирается на способ обзора пространства, предложенный в патенте [5]. Его реализация позволяет повысить энергетические характеристики дополнительного зондирующего луча на 6 дБ и обеспечить обнаружение малозаметных целей при сниженном пороговом уровне ОСШ в ходе жесткой программы смешанного обзора. Подтверждение отметок можно осуществлять при помощи дополнительного луча гибкой программы обзора и пороговом уровне ОСШ, обеспечивающем заданные вероятности обнаружения и ложной тревоги.

### Список литературы

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970. 570с.
2. Патент РФ № 2610833 МПК G01S 13/00. Способ обзора пространства / Задорожный В.В., Ларин А.Ю., Литвинов А.В., Помысов А.С., заявл. 27.10.2015, опубл. 10.02.2017, бюл. № 5.
3. Патент РФ № 2621680 МПК G01S 13/00. Способ обзора пространства / Задорожный В.В., Ларин А.Ю., Литвинов А.В., Помысов А.С., заявл. 09.03.2016, опубл. 07.06.2017, бюл. № 16.
4. Патент РФ № 2666763 МПК G01S 13/00 Способ обзора пространства / Задорожный В.В., Ларин А.Ю., Литвинов А.В., Омельчук И.С., Помысов А.С., заявл. 11.09.2017, опубл. 12.09.2018, Бюл. № 26.
5. Патент РФ № 2708371 МПК G01S 13/04 Способ обзора воздушного пространства радиолокационной станцией с активной фазированной антенной решеткой / Ларин А.Ю., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Винник Л.В., Шацкий В.В., заявл. 18.04.2019, опубл. 09.12.2019, бюл. № 34.
6. Мищенко Ю.А. Зоны обнаружения. М.: Воениздат, 1963. 96 с.
7. Мажура Н.Н., Пешко А.С., Юрчик И.А. Организация обзора пространства РЛС на основе ФАР с электронно-механическим сканированием // Радиотехника. 2009. № 8. С. 78–84.
8. Имитационная модель для исследования эффективности обзора пространства РЛС на основе ФАР с электронно-механическим сканированием / Н.Н. Мажура [и др.] // Радиотехника. 2010. № 7. С. 41–48.
9. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения / под ред. С.Ф. Боева. М.: Научная книга, 2019. 424 с.
10. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
11. Патент РФ № 2731604 МПК G01S 13/26. Способ построения системы диаграммообразования активной фазированной антенной решетки / Косогор А.А., Задорожный В.В., Ланкин А.С., Ларин А.Ю., Омельчук И.С., Васильев А.В., Чернышев М.И., заявл. 17.06.2019, опубл. 04.09.2020, бюл. № 25.
12. Skolnik M. Introduction to Radar Systems; 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 784 p.

### References

1. Shirman Ya.D. *Theoretical Foundations of Radar*. Moscow: Sov. radio, 1970, 570 p. (In Russ.)
2. RF patent No. 2610833 IPC G01S 13/00. A way to view the space / Zadorozhnyy V.V., Larin A.Yu., Litvinov A.V., Pomysov A.S., appl. 27.10.2015, publ. 10.02.2017, bul. no. 5.
3. RF patent No. 2621680 IPC G01S 13/00. A way to view the space / Zadorozhnyy V.V., Larin A.Yu., Litvinov A.V., Pomysov A.S., appl. 09.03.2016, publ. 07.06.2017, bul. no. 16.
4. RF patent No. 2666763 IPC G01S 13/00 Method for reviewing space / Zadorozhnyy V.V., Larin A.Yu., Litvinov A.V., Omel'chuk I.S., Pomysov A.S., appl. 11.09.2017, publ. 12.09.2018, bul. no. 26.
5. RF patent No. 2708371 IPC G01S 13/04 Method for surveying the airspace by a radar station with an active phased antenna array / Larin A.Yu., Litvinov A.V., Mishchenko S.E., Vinnik L.V., Shatskiy V.V., appl. 18.04.2019, publ. 09.12.2019, bul. no. 34.
6. Mishchenko Yu.A. *Detection Zones*. Moscow: Military Publishing House, 1963, 96 p. (In Russ.)
7. Mazhura N.N., Peshko A.S., Yurchik I.A. Organization of space surveillance radar based on phased array with electronic-mechanical scanning. *Radiotekhnika*, 2009, no. 8, pp. 78–84. (In Russ.)
8. Mazhura N.N. et al. Simulation model for studying the efficiency of space surveillance radar based on phased array with electronic-mechanical scanning. *Radiotekhnika*, 2010, no. 7, pp. 41–48. (In Russ.)
9. *Managing the Creation and Operation of Early Warning Radar Systems*. Ed. by S.F. Boev. Moscow: Nauchnaya kniga, 2019, 424 p. (In Russ.)

10. Farina A., Studer F. *Digital Processing of Radar Information. Goal Tracking*. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 320 p. (In Russ.)
11. RF patent No. 2731604 IPC G01S 13/26. A method for constructing a diagram formation system for an active phased antenna array / Kosogor A.A., Zadorozhnyy V.V., Lankin A.S., Larin A.Yu., Omel'chuk I.S., Vasil'ev A.V., Chernyshev M.I., appl. 17.06.2019, publ. 04.09.2020, bul. no. 25.
12. Skolnik M. *Introduction to Radar Systems*; 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 2001, 784 p.

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2022, vol. 25, no. 3, pp. 67–72

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.67-72

Received 14 March 2022  
Accepted 15 April 2022

### Antenna array control system with combination of strength and flexible scanning programs

Larisa V. Vinnik , Sergey E. Mishchenko 

FRPC «FSUE “RSRIRC”»  
130, Nansen Street,  
Rostov-on-Don, 344038, Russia

*Abstract* – The structure of the antenna array control system with a combination of strength and flexible scanning programs is proposed, characterized by the introduction of additional modules of statistics and expert assessments in the feedback circuit between the secondary processing module and hardware and software complexes for the formation of transmitting and receiving antenna array radiation patterns. The implementation of this structure allows for the formation of an additional transmitting and several receiving beams to confirm marks that do not meet the specified detection criterion. An algorithm for controlling an active phased array antenna has been developed, characterized by a procedure for additional confirmation of marks with a low signal-to-noise ratio due to the formation of additional transmitting and receiving beams. The estimates of the gain from the implementation of the proposed structural scheme of the antenna array control system and the algorithm of its functioning are obtained.

*Keywords* – antenna array; control system; browse method; mixed space scanning; strength scanning program; flexible scanning program.

---

#### Информация об авторах

**Винник Лариса Владимировна**, ведущий программист ФНПЦ «ФГУП “РНИИРС”», г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* анализ и синтез антенных решеток, обработка сигналов.

*E-mail:* mihome@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-4906-9215>

**Мищенко Сергей Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФНПЦ «ФГУП “РНИИРС”», г. Ростов-на-Дону, Россия.

*Область научных интересов:* анализ и синтез антенных решеток.

*E-mail:* mihome@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3210-1485>

#### Information about the Authors

**Larisa V. Vinnik**, software engineer of FRPC «FSUE “RSRIRC”», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* analysis and synthesis of array antennas, signal processing.

*E-mail:* mihome@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-4906-9215>

**Sergey E. Mishchenko**, Doctor of Technical Sciences, professor, leading researcher of FRPC «FSUE “RSRIRC”», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* analysis and synthesis of array antennas, signal processing.

*E-mail:* mihome@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3210-1485>