

УДК 621.319

СТРУКТУРА УСТРОЙСТВА СОВМЕСТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ МНОГОДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЕ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Д.С. НЕФЁДОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 15 мая 2013

Разработана структурная схема устройства совместного обнаружения летательного аппарата в электростатической многодатчиковой системе пассивной локации. В основу работы устройства положен алгоритм совместной обработки решений об обнаружении летательного аппарата пространственно-разнесенными датчиками.

Ключевые слова: электростатическая многодатчиковая система пассивной локации, совместное обнаружение, правило принятия решения об обнаружении.

Введение

Электростатическая многодатчиковая система пассивной локации (МСПЛ) предназначена для обнаружения и определения координат маловысотных летательных аппаратов (ЛА) на локальных участках местности. Принцип работы системы заключается в обнаружении датчиками возмущений естественного электрического поля Земли, создаваемых движением заряженного ЛА. Величина электрического заряда ЛА в полете может достигать от 10^{-6} до 10^{-4} Кл [1].

Наибольший вклад в исследования по разработке электростатической МСПЛ внесла группа ученых под руководством профессора Успенского А.К., трудившаяся над проблемой в Минском высшем зенитном ракетном училище противовоздушной обороны с 70-х гг. XX века. В существующих работах по данному направлению основное внимание уделено вопросу электризации ЛА в полете, разработке математических моделей полезного сигнала и естественных помех, синтезу алгоритмов обнаружения сигнала в одиночном электростатическом датчике [2, 3].

Многопозиционное построение системы позволяет реализовать в ней алгоритмы совместной обработки информации, использование которых позволяет повысить показатели эффективности системы. Цель данной статьи заключается в повышении такого показателя эффективности, как размер зоны контроля по фронту. Для достижения поставленной цели в статье разработана структура устройства совместного обнаружения.

Выбор уровня объединения информации в системе

На рис. 1 изображена обобщенная структурная схема электростатической МСПЛ. В ее состав входят электростатические датчики, пункт совместной обработки (ПСО), объединенные в локальную сеть при помощи линий передачи данных (ЛПД). Каждый датчик имеет зону обнаружения, ограниченную значениями дальности обнаружения 150...500 м. Для реализации системы с заданным потребителем локационной информации размерами зоны контроля, датчики размещаются на местности в разнесенных точках пространства, на расстоянии, определяемом размерами зоны обнаружения одиночного датчика. Информация от датчиков

поступает для обработки в ПСО, в котором принимается решение об обнаружении ЛА и определяются его координаты.

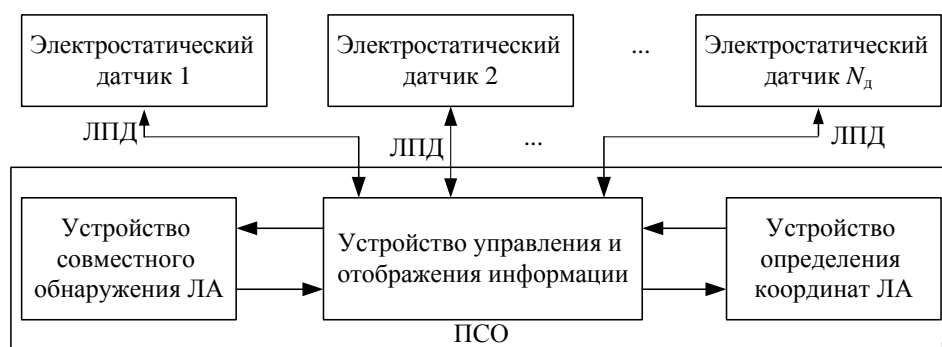


Рис. 1. Структурная схема электростатической МСПЛ

Уровень объединения информации в многопозиционной системе позволяет определить этапы обработки информации и функциональное назначение ее элементов. По аналогии с многопозиционными радиолокационными станциями в электростатической МСПЛ возможно два уровня объединения информации: объединение сигналов и объединение единичных замеров [4], в соответствии с которыми можно предложить два варианта построения устройства совместного обнаружения.

Совместное обнаружение ЛА электростатической МСПЛ с объединением сигналов в ПСО. Структурная схема обнаружителя электростатической МСПЛ по аналогии с многопозиционными РЛС имеет вид, представленный на рис. 2.

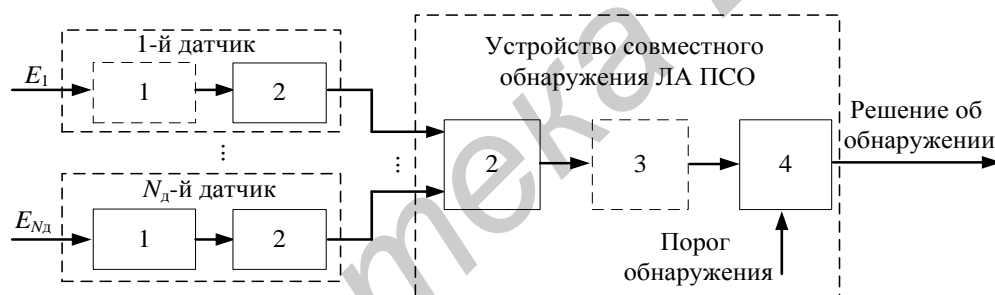


Рис. 2. Структурная схема устройства обнаружения ЛА электростатической МСПЛ с объединением сигналов в ПСО:

- 1 – преобразователь напряженности поля с усилителем; 2 – устройство приема-передачи данных;
- 3 – устройство пространственно-временной обработки; 4 – устройство принятия решения

Электростатический датчик состоит из преобразователя напряженности поля с усилителем и устройства приема-передачи данных. В ПСО реализуются пространственно-временная обработка полезного сигнала и естественных помех от всех датчиков, входящих в систему, и принятие решения об обнаружении ЛА. Достоинствами такого обнаружителя являются упрощенная структура электростатического датчика и возможность увеличения размеров зоны контроля системы за счет использования при обработке различий в пространственной корреляции естественных помех и полезных сигналов.

Совместное обнаружение ЛА электростатической МСПЛ с объединением решений об обнаружении. На рис. 3 приведена структурная схема децентрализованного обнаружителя в электростатической МСПЛ. Каждый электростатический датчик осуществляет обработку полезного сигнала и естественных помех с последующим принятием решения об обнаружении. На совместную обработку в ПСО передаются единичные решения и оценки времени обнаружения. Окончательное решение принимается в ПСО в результате совместной обработки решений, принятых во всех датчиках.

Техническая реализация децентрализованного обнаружителя (см. рис. 3) значительно проще. При определенных условиях он обеспечивает большую надежность и живучесть МСПЛ [4]. Кроме того, объединение единичных замеров за счет сокращения объема данных, передаваемых датчиками в ПСО, позволяет снизить требования к пропускной способности

ЛПД, повысить количество датчиков, функционирующих с одним ПСО. При использовании беспроводных ЛПД в электростатической МСПЛ, отсутствие необходимости постоянной передачи данных сохраняет одно из важных достоинств пассивной системы – скрытность работы.

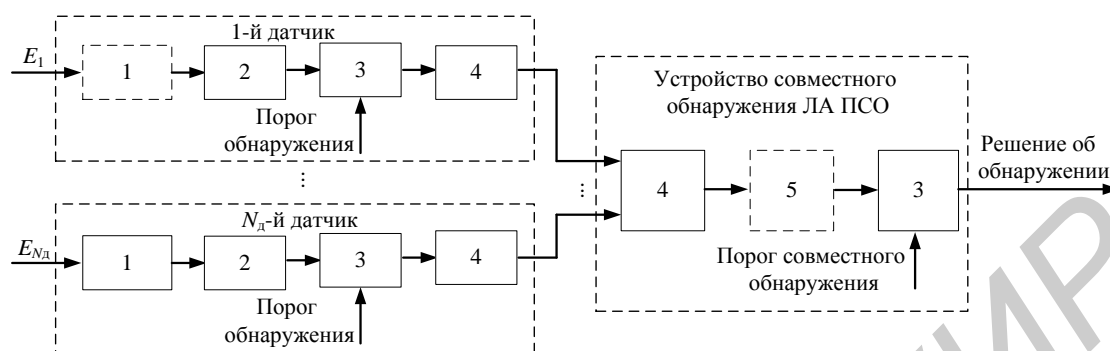


Рис. 3. Структурная схема устройства обнаружения ЛА электростатической МСПЛ с объединением решений об обнаружении:

- 1 – преобразователь напряженности поля с усилителем; 2 – устройство обработки;
- 3 – устройство принятия решения; 4 – устройство приема-передачи данных;
- 5 – устройство совместной обработки

Таким образом, учитывая достоинства и недостатки рассмотренных устройств совместного обнаружения с точки зрения простоты технической реализации, обеспечения более высокой надежности и живучести системы, наиболее предпочтительным для электростатической МСПЛ является использование алгоритмов, объединяющих единичные решения.

Алгоритм совместного обнаружения

При объединении единичных замеров, на входе ПСО наблюдается реализация многомерной случайной величины

$$\mathbf{A}^* = \{A_1^*, A_2^*, \dots, A_{N_d}^*\}, \quad (1)$$

где $A_i^*; i = \overline{1, N_d}$ – решение об обнаружении ЛА i -м датчиком; N_d – количество датчиков в системе.

Для входного воздействия (1) при условии статистической независимости шумов, независимости амплитудных флуктуаций полезного сигнала, а также равенстве вероятности ложной тревоги в пространственно-разнесенных датчиках алгоритм совместного обнаружения ЛА имеет вид [5]:

$$\text{если } Z_c = \sum_{i=1}^{N_d} A_i^* \geq Z_{0c}, \text{ то } A_c^* = 1, \text{ иначе } A_c^* = 0, \quad (2)$$

где Z_c – логарифм отношения правдоподобия в устройстве совместного обнаружения ПСО; Z_{0c} – порог совместного обнаружения; A_c^* – решение об обнаружении ЛА i -м датчиком.

Алгоритм (2) заключается в суммировании частных решений об обнаружении ЛА датчиками системы и сравнении суммы с порогом. Порог обнаружения выбирается по критерию Неймана-Пирсона и может принимать дискретные значения от 1 до N_d .

При равенстве вероятностей ложной тревоги во всех датчиках выражения для вероятности правильного обнаружения $D_{\text{ПСО}}$ и ложной тревоги $F_{\text{ЛТС}}$ электростатической МСПЛ, характеризующие эффективность алгоритма совместного обнаружения (2), определяются выражениями [4]:

$$D_{\text{Пос}} = \sum_{k=n}^{N_d} \sum_{i_1=1}^{N_d-k+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{N_d-k+2} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^{N_d} \left[D_{\text{Пос}_{i_1}} D_{\text{Пос}_{i_2}} \dots D_{\text{Пос}_{i_k}} \prod_{l=1}^{N_d} (1 - D_{\text{Пос}_l}) \right], l \neq i_1, \dots, i_k; \quad (3)$$

$$F_{\text{ЛТс}} = \sum_{k=n}^{N_d} C_{N_d}^k F_{\text{ЛТ}}^k (1 - F_{\text{ЛТ}})^{N_d-k}, \quad (4)$$

где $C_{N_d}^k$ – количество сочетаний k по N_d .

Из выражений (3), (4) следует, что эффективность алгоритма совместного обнаружения зависит от общего количества датчиков системы, вида решающего правила, вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги каждого датчика.

Алгоритм совместного обнаружения системы, состоящей из N_d датчиков оптимизируется путем выбора параметра n , обеспечивающего максимальную вероятность правильного обнаружения $D_{\text{Пос}}$, при ограничении на уровень ложных тревог вида

$$F_{\text{ЛТс}} \leq F_{\text{ЛТз}}, \text{ где } F_{\text{ЛТз}} \text{ – заданная вероятность ложных тревог системы.}$$

Методика оптимизации алгоритма совместного обнаружения

При оптимизации алгоритма совместного обнаружения ЛА необходимо учитывать особенности электростатической МСПЛ.

1. *Различие вероятностей правильного обнаружения ЛА в пространственно-разнесенных датчиках.* Вероятность правильного обнаружения ЛА электростатическим датчиком определяется отношением сигнал/шум, зависящим от величины собственного заряда ЛА и параметров его полета относительно точки размещения датчика [6].

2. *Последовательное обнаружение ЛА пространственно-разнесенными датчиками.* Обнаружение ЛА, исходя из особенностей построения электростатической МСПЛ, происходит последовательно во времени по мере появления полезного сигнала в каждом датчике, как это показано на рис. 4.

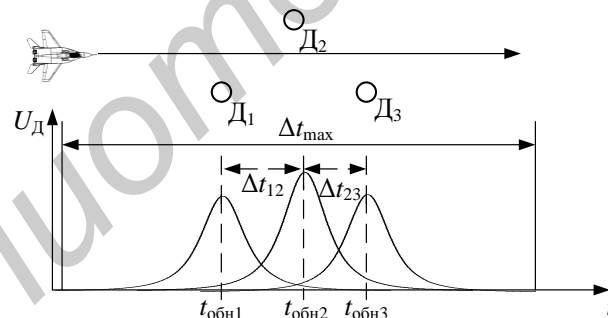


Рис. 4. Последовательность обнаружения ЛА датчиками

Появление решений об обнаружении, обусловленных ложным срабатыванием датчиков, происходит в случайные моменты времени. Исходя из этого, при совместной обработке решений об обнаружении ЛА в ПСО необходим дополнительный анализ временного интервала между моментами принятия решений датчиками на предмет его соответствия допустимой задержке Δt_{max} . Допустимая задержка будет зависеть от скорости, траектории полета ЛА и расстояния между датчиками.

Учитывая особенности системы, оптимизацию алгоритма совместного обнаружения следует проводить по методике, основное содержание которой представлено ниже.

1. Выбор правила принятия решения об обнаружении « n из N_d ».
2. Определение вероятности ложной тревоги каждого датчика $F_{\text{ЛТд}}$.

Рассматривая ложные срабатывания датчиков как пуассоновский поток событий и учитывая, что ложное обнаружение ЛА системой возможно только при попадании не менее n

из них на интервал времени Δt_{\max} , после преобразований уравнение, по которому определяется $F_{\text{ЛТД}}$ принимает вид:

$$F_{\text{ЛТЗ}} = 1 - \left\{ 1 - \sum_{k=n}^{N_d} C_{N_d}^k \left(1 - \exp\left(-\frac{F_{\text{ЛТД}} \Delta t_{\max}}{\Delta t}\right) \right)^k \left(\exp\left(-\frac{F_{\text{ЛТД}} \Delta t_{\max}}{\Delta t}\right) \right)^{N_d - k} \right\}^{\frac{T_{\text{лс}}}{\Delta t_{\max}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{лс}}$ – время, в течение которого ложное срабатывание системы произойдет с вероятностью $F_{\text{ЛТЗ}}$, с; Δt – интервал дискретизации сигнала в датчике, с.

При однопозиционной обработке, которой соответствует правило принятия решения «1 из N_d » выражение (5) преобразуется к виду:

$$F_{\text{ЛТЗ}} = 1 - \exp\left(-\frac{N_d F_{\text{ЛТД}} T_{\text{лс}}}{\Delta t}\right).$$

3. Определение вероятности правильного обнаружения каждого датчика для фиксированного расстояния между ними.

При нормальном законе распределения выходного сигнала устройства обработки датчика, вероятность правильного обнаружения определяется по формуле:

$$D_{\text{ПО}_i} = 1 - \Phi\left[\Phi^{-1}(1 - F_{\text{ЛТД}}) - \gamma_i(r_d)\right],$$

где $\Phi(x)$, $\Phi^{-1}(x)$ – прямая и обратная функция Лапласа; $\gamma_i(r_d)$ – отношение сигнал/шум на выходе устройства обработки i -го электростатического датчика; r_d – расстояние между датчиками.

4. Вычисление вероятности правильного обнаружения системы по выражению (4).

5. Многократное повторение расчетов по пунктам 1–4 для различных правил принятия решения и расстояний между датчиками позволяет определить правило, которое обеспечивает максимальное расстояние между датчиками для заданных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги системы.

Структурная схема устройства совместного обнаружения

С использованием описанной методики проведен расчет оптимального правила принятия решения для следующих исходных данных: заряд ЛА – $5 \cdot 10^{-5}$ Кл, скорость полета ЛА – 250 м/с, высота полета ЛА – 400 м, количество датчиков в системе – 8, вероятность ложной тревоги системы – 10^{-6} . Результаты расчетов в качестве зависимостей вероятности правильного обнаружения системы от расстояния между датчиками, для различных направлений полета ЛА относительно линии размещения датчиков, представлены на рис. 5 (номер кривой соответствует количеству датчиков, обнаружение ЛА которым обеспечит принятие решения об обнаружении ЛА в МСПЛ).

Как видно из рис. 5, оптимальным правилом принятия решения об обнаружении ЛА в электростатической МСПЛ по критерию максимума расстояния между датчиками является правило «2 из N_d » (рис. 5, кривая 2). Оптимум достигается в результате действия двух противоположных факторов: с одной стороны, ужесточение решающего правила приводит к необходимости обнаружения ЛА большим количеством датчиков, что заставляет размещать их на меньшем расстоянии, а с другой, чтобы при более жестком правиле обеспечить заданную вероятность ложной тревоги системы, порог обнаружения в каждом датчике следует снижать, что приводит к увеличению дальности обнаружения датчиков, а соответственно и расстояния между ними.

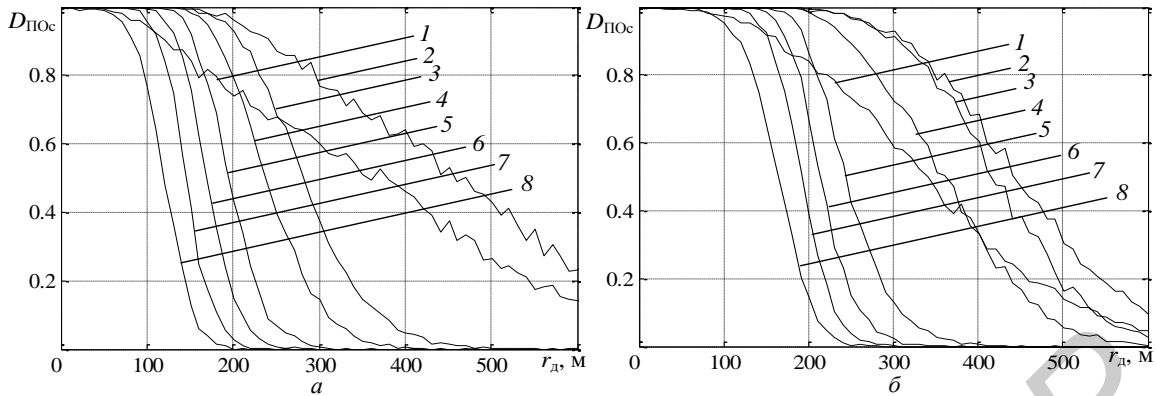


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного обнаружения ЛА электростатической МСПЛ от расстояния между датчиками:
 a – направление полета ЛА 0 град; b – направление пролета ЛА 40 град

Структурная схема устройства совместного обнаружения ЛА в электростатической МСПЛ, в которой реализовано правило принятия решения об обнаружении «2 из N_d », изображена на рисунке.

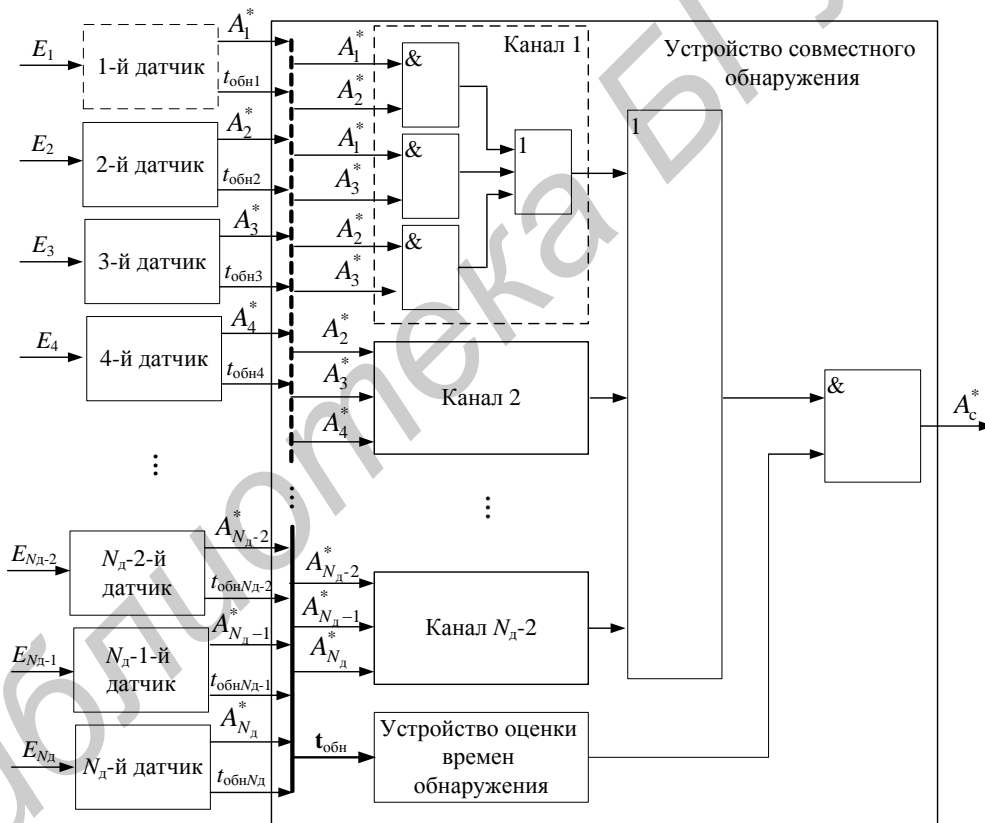


Рис. 6. Структурная схема устройства обнаружения ЛА электростатической МСПЛ

Представленная структурная схема использует при совместной обработке совокупность решений об обнаружении ЛА, за счет чего позволяет увеличить расстояние между датчиками, связанное прямо пропорциональной зависимостью с размером зоны контроля системы по фронту.

Сравнивая кривые 1 и 2 на рис. 5, a и b можно сделать вывод, что использование разработанного устройства совместного обнаружения ЛА в электростатической МСПЛ при вероятности правильного обнаружения 0,9 и ложной тревоги 10^{-6} , позволяет увеличить размер зоны контроля системы по фронту в 1,7...1,9 раза.

Заключение

В электростатической МСПЛ для обнаружения ЛА используется алгоритм совместной обработки частных решений об обнаружении ЛА пространственно-разнесенными датчиками. Его достоинствами являются снижение требований к пропускной способности ЛПД, простота технической реализации, увеличение количества датчиков, функционирующих с одним ПСО, высокая скрытность работы системы. Эффективность алгоритма зависит от общего количества датчиков системы, вида решающего правила, вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги каждого датчика.

Оптимальной по критерию максимума расстояния между датчиками при фиксированной вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги системы является структура устройства, в которой реализовано правило принятия решения об обнаружении «2 из N_d ».

Использование разработанной структурной схемы позволяет увеличить размер зоны контроля системы по фронту в 1,7...1,9 раза по сравнению с однопозиционным обнаружением.

STRUCTURE OF THE JOINT DETECTION DEVICES AIRCRAFT IN ELECTROSTATIC MULTI-SENSOR SYSTEM OF PASSIVE LOCATION

D.S. NEFEDOV

Abstract

The paper developed a structural diagram of the simultaneous detection of the aircraft in the electrostatic multisensor system of passive location. The basis of the device is algorithm co-processing solutions for detecting aircraft spatially separated sensors.

Список литературы

1. *Имянитов И.М.* Электризация самолета в облаках и осадках. Ленинград, 1970.
2. *Успенский А.К.* Вопросы теории и техники использования электрических полей для локации объектов: Дис. ... д-ра техн. наук. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1979.
3. *Мелец А.Ф.* Обнаружение и дистанционное измерение электрического заряда маловысотных аэродинамических объектов: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1991.
4. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. М., 1993.
5. *Нефедов Д.С.* // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2012. № 22. С. 82–88.
6. *Казарин А.В., Мелец А.Ф., Нефедов Д.С.* // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2011. № 4. С. 146–154.