

УДК 621.396.969  
DOI: 10.15827/0236-235X.132.651-660

Дата подачи статьи: 04.03.20  
2020. Т. 33. № 4. С. 651–660

## **Метод функционирования системы бортовых РЛС при обеспечении скрытности их работы на излучение**

А.В. Богданов<sup>1</sup>, д.т.н., профессор

Д.В. Закомолдин<sup>1</sup>, к.т.н., докторант, denjuga68@yandex.ru

С.И. Акимов<sup>1</sup>, адъюнкт

<sup>1</sup> Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь, 170100, Россия

Живучесть летательного аппарата военного назначения в существенной степени зависит от живучести его бортовой РЛС, основными направлениями повышения которой являются, во-первых, применение многопозиционного принципа построения бортовых РЛС, во-вторых, повышение скрытности ее работы на излучение.

В статье поставлена и решена задача разработки метода, объединяющего данные направления повышения живучести. Применение многопозиционного принципа реализовано за счет объединения всех бортовых РЛС в единую систему, управляемую бортовой РЛС самолета-лидера, определяемого заранее и выполняющего функцию пункта обработки радиолокационной информации, поступающей с бортовых РЛС всех самолетов группы, и выдачи информации на все самолеты группы о требуемых параметрах работы их бортовых РЛС. Обеспечение скрытности работы системы бортовых РЛС на излучение при обнаружении группы самолетов противника, оснащенных станциями радиотехнической разведки, реализовано посредством приема на каждой бортовой РЛС системы информации с самолета-лидера о требуемых параметрах работы их бортовых РЛС, а именно значений средней мощности излучения передатчика, времени когерентного накопления в приемнике и времени облучения воздушной цели и формирования текущих значений данных управляемых параметров работы бортовой РЛС таким образом, чтобы разность между требуемыми и текущими значениями параметров работы бортовых РЛС была равна нулю.

Проводимые на борту самолета-лидера вычисления, приведенные в статье, выдача результатов вычислений на каждую бортовую РЛС системы, а также управление параметрами работы каждой бортовой РЛС системы позволяют контролировать отношение сигнал/шум, формируемое на входе приемников всех станций радиотехнической разведки противника, и тем самым обеспечить скрытность работы системы бортовых РЛС на излучение с заданной вероятностью при обнаружении группы самолетов противника, оснащенных станциями радиотехнической разведки.

**Ключевые слова:** импульсно-доплеровская бортовая РЛС, истребитель, станция радиотехнической разведки, скрытность работы, управление параметрами, мощность излучения, время когерентного накопления, многопозиционные РЛС, система.

Известно, что повышение живучести летательного аппарата военного назначения (истребителя, беспилотного летательного аппарата), в частности, импульсно-доплеровской бортовой РЛС (БРЛС), которой он оснащен, в последние десятилетия является устойчивой тенденцией его совершенствования. Следует выделить два основных направления повышения данного показателя [1, 2]:

– использование многопозиционного принципа построения БРЛС, который дополнительно обеспечивает расширение их функциональных возможностей [3–5];

– повышение скрытности каждого летательного аппарата в составе группы.

Под многопозиционным принципом построения РЛС в общем случае понимаются

РЛС, включающие несколько разнесенных передающих, приемных и приемопередающих позиций, в которых получаемая ими информация о целях обрабатывается совместно [3, 6]. В данной статье рассмотрена ситуация, когда приемопередающие позиции (БРЛС) расположены на борту летательного аппарата.

Под скрытностью понимается свойство летательного аппарата, исключающее возможность его обнаружения средствами активной и пассивной разведки противника. Основным направлением противодействия средствам активной разведки является применение специальных покрытий и материалов в интересах снижения эффективной поверхности отражения летательного аппарата. Этому посвящено отдельное направление исследований [7–9].

Однако эффективность данных технических мер оправдывается только при полете в режиме полного радиомолчания ввиду того, что большинство современных средств воздушно-космического нападения оснащены средствами пассивной разведки, а именно станциями радиотехнической разведки (РТР), и имеют возможность обнаружить излучаемый БРЛС зондирующий сигнал и, как следствие, летательный аппарат в целом. В данной работе будет уделено внимание именно обеспечению скрытной работы БРЛС на излучение.

С учетом этого цель авторов – разработка метода, комбинирующего два описанных направления повышения живучести и заключающегося в управлении параметрами импульсно-доплеровской БРЛС каждого летательного аппарата в составе группы (многопозиционный принцип построения БРЛС) при работе каждой БРЛС на излучение в интересах обеспечения скрытности их работы с заданной вероятностью при обнаружении группы летательных аппаратов противника, оснащенных станциями РТР.

### Физический смысл метода

Рассмотрим конкретную тактическую ситуацию (рис. 1).

При обнаружении группой в общем случае из  $N$  летательных аппаратов, например двух (I и II) истребителей, каждый из которых оснащен БРЛС группы в общем случае из  $M$ , например двух (I и II), самолетов противника, каждый из которых оснащен станцией РТР, необходимо обеспечить ситуацию, когда каждая БРЛС истребителя обнаруживает самолеты противника с заданной вероятностью (на ри-

сунке 1 – пунктирная линия, желтый фон), а радиолокационное поле, создаваемое всеми БРЛС, недоступно для обнаружения станциями РТР противника (ограничено сплошной линией). Взаимное расположение истребителей группы и самолетов противника в общем случае может быть различным, а в данном примере имеет следующие параметры:

- расстояние между первым истребителем и первым самолетом противника больше расстояния между первым истребителем и вторым самолетом противника,  $D_{1I} > D_{1II}$ ;
- расстояние между вторым истребителем и первым самолетом противника больше расстояния между вторым истребителем и вторым самолетом противника,  $D_{2I} > D_{2II}$ .

Для обеспечения данной ситуации из всего состава группы определяется истребитель-лидер, на котором осуществляется обработка радиолокационной информации, и все импульсно-доплеровские БРЛС остальных истребителей группы объединяются в единую систему посредством формирования канала обмена информацией между каждым истребителем и истребителем-лидером. Далее в соответствии со штатным функционированием в каждой  $i$ -й, где  $i = \overline{1, N}$ , импульсно-доплеровской БРЛС  $i$ -го истребителя группы формируется высокочастотная последовательность зондирующих импульсов, осуществляются их усиление по мощности, излучение в направлении группы самолетов противника, прием и обработка принятого сигнала (селекция по дальности и скорости самолетов противника).

В процессе функционирования в каждой  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы определяются макси-

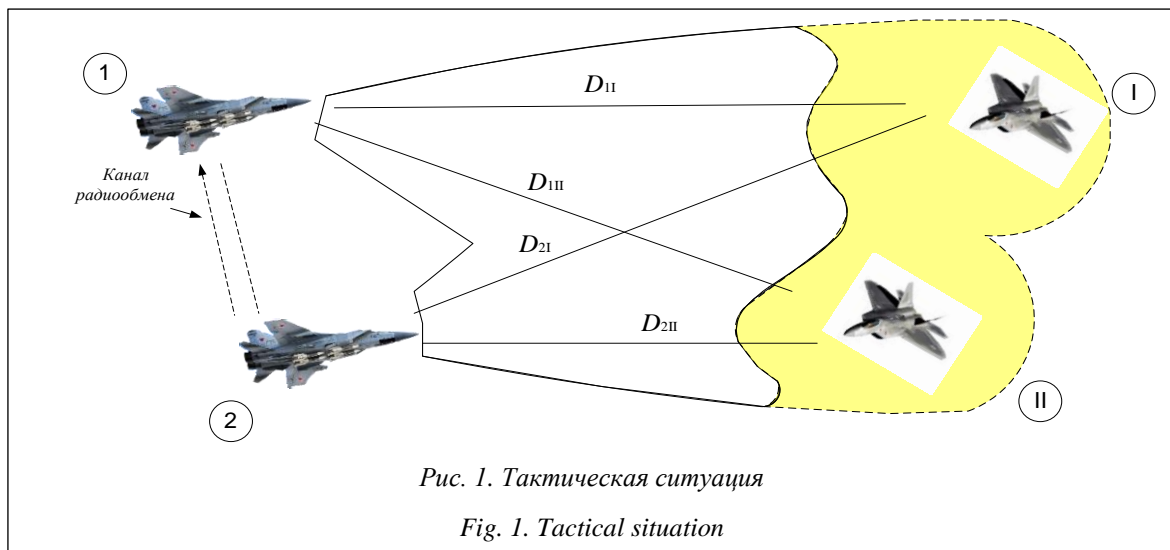


Рис. 1. Тактическая ситуация

Fig. 1. Tactical situation

мальные ( $D_{\text{ш}_{\max}}$ ) и минимальные ( $D_{\text{ш}_{\min}}$ ) из измеренных дальностей между  $i$ -м истребителем из состава группы и каждым самолетом противника из состава их группы, которые по каналу обмена информацией между всеми истребителями группы передаются на истребитель-лидер, для которого принимается  $i = 1$ .

На истребитель-лидере определяется требуемое отношение сигнал/шум  $Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}}$ , значение которого не должно превышать отношение сигнал/шум, создаваемое на входе приемника каждой станции РТР, для исключения возможности обнаружения зондирующих сигналов БРЛС [10, 11], то есть обеспечения скрытности с заданной вероятностью при фиксированной вероятности ложной тревоги в соответствии с выражениями:

$$Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} = [h - \Phi^{-1}(1 - P_{\text{по}}^{\text{ртр}})]^2, \quad (1)$$

$$h = \Phi^{-1}(1 - P_{\text{лт}}^{\text{ртр}}), \quad (2)$$

где  $h$  – величина порога, определяющая значение вероятности ложной тревоги  $P_{\text{лт}}^{\text{ртр}}$  при обнаружении станцией РТР каждого самолета противника излучения всех БРЛС истребителей группы, объединенных в их РЛС;  $P_{\text{по}}^{\text{ртр}}$  – вероятность правильного обнаружения станцией РТР каждого самолета противника излучения всех БРЛС истребителей группы, объединенных в их радиолокационную систему;  $\Phi^{-1}$  – функция, обратная функции Лапласа.

Далее на импульсно-доплеровской БРЛС истребителя-лидера формируются необходимые для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум  $Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}}$  значения управляемых параметров функционирования каждой  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы  $x_{\text{mij}} = [P_{\text{брлси}}^{\text{тр}}, T_{\text{обли}}^{\text{тр}}, T_{\text{кни}}^{\text{тр}}]^T$ , позволяющие обеспечить скрытность с заданной вероятностью, где  $j = \overline{1, 3}$  – номер требуемого управляемого параметра работы  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС  $i$ -го истребителя группы;  $P_{\text{брлси}}^{\text{тр}}$  – требуемое значение средней излучаемой мощности передатчика  $i$ -й БРЛС;  $T_{\text{обли}}^{\text{тр}}$  – требуемое время облучения группы самолетов противника, оснащенных станциями РТР;  $T_{\text{кни}}^{\text{тр}}$  – требуемое время когерентного накопления сигнала в приемнике  $i$ -й БРЛС  $i$ -го истребителя группы. Данные параметры формируются в соответствии с выражениями:

$$P_{\text{брлс1}}^{\text{тр}} = \frac{D_{\text{ш}_{\min}}^2 Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} N_0^{\text{ртр}} (4\pi)^2}{2G_{\text{брлс}} G_{\text{ртр}} \lambda_{\text{брлс}}^2 T_{\text{с1}} N}, \quad (3)$$

$$P_{\text{брлси}}^{\text{тр}} = \frac{D_{\text{ш}_{\min}}^2 Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} N_0^{\text{ртр}} (4\pi)^2 Z_i}{2G_{\text{брлс}} G_{\text{ртр}} \lambda_{\text{брлс}}^2 T_{\text{сi}} N}, \quad (4)$$

$$Z_i = \frac{D_{\text{ш}_{\min}}^2 T_{\text{с1}}}{D_{\text{ш}_{\min}}^2 T_{\text{сi}}}, \quad (5)$$

$$T_{\text{кни}}^{\text{тр}} = T_{\text{обли}}^{\text{тр}} = \frac{(4\pi)^2 D_{\text{ш}_{\max}}^4 \alpha_{\text{п}} N_0 R_0}{2P_{\text{брлси}}^{\text{тр}} G_{\text{брлс}} S_a \sigma_{\text{ртр}}}, \quad (6)$$

$$T_{\text{сi}} = kT_{\text{кни}}^{\text{тр}}, \quad (7)$$

где, кроме ранее принятых,  $T_{\text{сi}}$  – время обработки сигнала, излученного  $i$ -м истребителем группы, в каждой станции РТР каждого самолета противника;  $k = (0, \dots, 1)$  – коэффициент проигрыша энергии сигнала при его обработке на станции РТР по сравнению с его когерентной обработкой в каждой  $i$ -й БРЛС;  $Z_i$  – поправочный коэффициент при переносе  $i$ -й БРЛС на позицию БРЛС истребителя-лидера;  $R_0$  – отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума, при котором обеспечивается обнаружение самолета противника с заданными вероятностными характеристиками.

Кроме того, имеются характеристики, которые в общем случае могут быть различными, но для упрощения записей аналитических зависимостей приняты равными:

$G_1, \dots, G_N = G_{\text{брлс}}$  – коэффициенты направленного действия антенн бортовых РЛС всех истребителей группы;

$G_1, \dots, G_M = G_{\text{ртр}}$  – коэффициенты направленного действия антенн станций РТР самолетов противника;

$\lambda_1, \dots, \lambda_N = \lambda_{\text{брлс}}$  – длины волн всех импульсно-доплеровских БРЛС;

$N_{01}, \dots, N_{0N} = N_0$  – спектральные плотности мощностей внутренних шумов приемника импульсно-доплеровских БРЛС;

$N_{01}^{\text{ртр}}, \dots, N_{0M}^{\text{ртр}} = N_0^{\text{ртр}}$  – спектральные плотности мощностей внутренних шумов приемника станций РТР;

$S_{a1}, \dots, S_{aN} = S_a$  – эффективные площади приемных антенн всех импульсно-доплеровских БРЛС группы истребителей;

$\sigma_{\text{ртр1}}, \dots, \sigma_{\text{ртрM}} = \sigma_{\text{ртр}}$  – эффективная площадь отражения каждого самолета противника из состава их группы;

$\alpha_{п1}, \dots, \alpha_{пN} = \alpha_{\text{п}}$  – коэффициенты потерь энергии сигнала при его обработке в приемнике в каждой  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС;

$Q_1, \dots, Q_M$  – требуемые отношения сигнал/шум на входе приемника каждой станции РТР каждого самолета противника, причем  $Q_1, \dots, Q_M < Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}}$ .

Выражение (3) обусловлено следующим [11]. С учетом

$$Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} = \frac{2P_{\text{ртр}}^{\text{тр}} T_c}{N_0^{\text{ртр}}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ртр}}^{\text{тр}}$  – минимальное значение мощности сигнала на входе приемника станции РТР для обеспечения заданных вероятностных характеристик, приняв в выражении дальности обнаружения станции РТР [12, 13]

$$D_{\text{ртр}} = \sqrt{\frac{P_{\text{брлс}} G_{\text{брлс}} G_{\text{ртр}} \lambda_{\text{брлс}}^2}{(4\pi)^2 P_{\text{ртр}}}}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{ртр}}$  – чувствительность приемника станции РТР,  $P_{\text{ртр}} = P_{\text{ртри}}^{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} N_0^{\text{ртр}}}{2T_{ci}}$ , учитывая то, что

система из  $N$  импульсно-доплеровских БРЛС работает на излучение (то есть излучаемая мощность каждой  $i$ -й БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы должна быть в  $N$  раз меньше в интересах обеспечения скрытности работы на излучение всех БРЛС их системы) и заменив ее (систему БРЛС) на эквивалентный источник излучения, располагаемый на позиции самолета-лидера ( $i = 1$ ), а также учитывая, что станция РТР обнаруживает наиболее доступный зондирующий сигнал БРЛС истребителя-лидера группы, находящийся на минимальном до нее расстоянии  $D_{\text{ц1}_{\text{min}}}$ , то, приравняв  $D_{\text{ртр}} = D_{\text{ц1}_{\text{min}}}$ , выражение (9) преобразуется к виду (3).

Наличие в выражении (4) характеризующего требуемое значение излучаемой мощности передатчика каждой  $i$ -й БРЛС из состава их системы каждого  $i$ -го истребителя группы для всех остальных, кроме истребителя-лидера, истребителей группы ( $i \neq 1$ ), поправочного коэффициента  $Z_i$ , вычисляемого в соответствии с выражением (5), обусловлено переносом данной  $i$ -й БРЛС с дальности  $D_{\text{ц1}_{\text{min}}}$  на дальность  $D_{\text{ц1}_{\text{min}}}$  эквивалентного источника излучения (позицию истребителя-лидера), заменяющего систему БРЛС.

Выражение (5) определяется исходя из принятых допущений, преобразующих выражение (9) в выражение (3), и решением системы вида

$$\begin{cases} D_{\text{ц1}_{\text{min}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{брлс1}} G_{\text{брлс}} G_{\text{ртр}} \lambda_{\text{брлс}}^2 2T_{ci}}{(4\pi)^2 Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} N_0^{\text{ртр}}}}, \\ D_{\text{ц1}_{\text{min}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{брлс1}} G_{\text{брлс}} G_{\text{ртр}} \lambda_{\text{брлс}}^2 2T_{c1}}{(4\pi)^2 Q_{\text{ртр}}^{\text{троб}} N_0^{\text{ртр}}}}, \end{cases} \quad (10)$$

приравняв  $P_{\text{брлс1}} = P_{\text{брлс1}} Z_i$  относительно  $Z_i$ .

Выражение (6) обусловлено необходимостью сохранения возможности обнаружения каждой  $i$ -й БРЛС из состава их системы каждого  $i$ -го истребителя группы максимально удаленного самолета противника из состава их группы, находящегося на дальности  $D_{\text{цi}_{\text{max}}}$  относительно каждого  $i$ -го истребителя группы. Это достигается за счет увеличения времени когерентного накопления энергии зондирующего сигнала пропорционально дальности  $D_{\text{цi}_{\text{max}}}$ , с учетом требуемого значения мощности излучения передатчика, вычисляемого в соответствии с выражениями (3) и (4). Из формулы дальности обнаружения импульсно-доплеровской БРЛС

$$D_{\text{брлс}} = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{брлс}} T_{\text{кн}} G_{\text{брлс}} S_a \sigma_{\text{ртр}}}{(4\pi)^2 \alpha_{\text{п}} N_0 R_0}}, \quad (11)$$

выразив время когерентного накопления  $T_{\text{кн}}$  и приравняв  $D_{\text{брлс}} = D_{\text{цi}_{\text{max}}}$ ,  $P_{\text{брлс}} = P_{\text{брлс1}}^{\text{тр}}$ ,  $T_{\text{кн}} = T_{\text{кн1}}^{\text{тр}} = T_{\text{обл1}}^{\text{тр}}$ , выражение (11) преобразуется в выражение (4).

Выражение (7) обусловлено отсутствием на каждом самолете противника, оснащеном станцией РТР, априорной информации о параметрах зондирующего сигнала каждой  $i$ -й БРЛС, что приводит к проигрышу в энергии сигнала при его обработке в станции РТР самолета противника относительно когерентной обработки в БРЛС истребителя.

Далее вычисленный на самолете-лидере в соответствии с выражениями (3)–(7) требуемый вектор параметров работы каждой в составе системы БРЛС  $x_{\text{тij}} = \left[ P_{\text{брлс1}}^{\text{тр}}, T_{\text{обл1}}^{\text{тр}}, T_{\text{кн1}}^{\text{тр}} \right]^T$  передается в каждую  $i$ -ю БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы.

С учетом полученной информации о  $x_{\text{тij}}$  формируется параметр рассогласования  $\Delta_{ij}$ , пропорционально которому вырабатывается управляющий сигнал  $U_{ij}$  в интересах управления в каждой  $i$ -й БРЛС каждого  $i$ -го истребителя из состава группы средней мощностью излучения  $P_{\text{брлс}}$  передатчика и временами когерентного накопления сигнала  $T_{\text{кн}}$  в приемнике и облучения  $T_{\text{обл}}$  группы самолетов противника, в соответствии с выражением

$$\Delta_{ij} = x_{t1j} - x_{y1j}, \tag{12}$$

где  $x_{yij} = |P_{брлси}, T_{обли}, T_{кни}|^T$  – текущие значения управляемых параметров в каждой  $i$ -й БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы;  $P_{брлси}, T_{обли}, T_{кни}$  – текущие значения в каждой  $i$ -й БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы средней излучаемой мощности передатчика БРЛС, времени облучения группы самолетов противника, оснащенных станциями РТР, и времени когерентного накопления сигнала в приемнике соответственно. Управление средней мощностью излучения  $P_{брлс}$  передатчика, временами когерентного накопления сигнала  $T_{кн}$  в приемнике каждой  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы и облучения  $T_{обл}$  группы самолетов противника осуществляется до тех пор, пока параметр рассогласования в каждой  $i$ -й импульсно-доплеровской БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы,

определяемый выражением (12), не будет равен нулю.

Схема метода представлена на рисунке 2.

Таким образом, для обеспечения скрытности работы системы импульсно-доплеровских БРЛС при групповых действиях истребителей на излучение с заданной вероятностью при фиксированной вероятности ложного обнаружения излучения системы БРЛС станциями РТР противника, во-первых, на самолете-лидере в соответствии с выражениями (1) и (2) определяется требуемое отношение сигнал/шум  $Q_{ртр}^{трб}$  на входе приемника станции РТР, во-вторых, в соответствии с формулами (3), (4) и (6) и с учетом формул (5) и (7) на истребителе-лидере группы определяются требуемые значения  $P_{брлси}^{тр}, T_{обли}^{тр}, T_{кни}^{тр}$ , которые по каналу обмена информацией передаются на каждый  $i$ -й истребитель, и, в-третьих, в

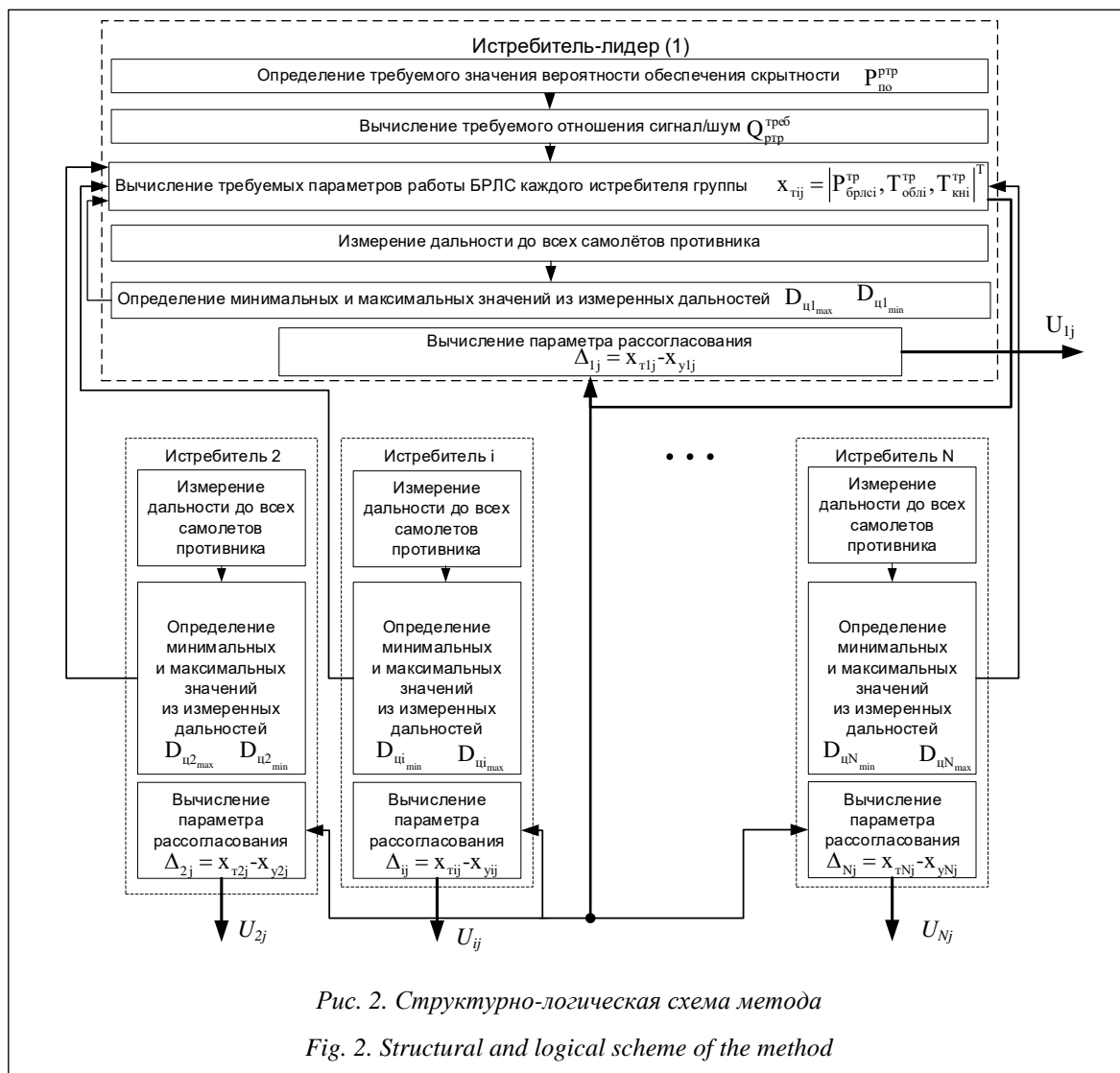


Рис. 2. Структурно-логическая схема метода

Fig. 2. Structural and logical scheme of the method

соответствии с выражением (12) в каждой  $i$ -й БРЛС каждого  $i$ -го истребителя группы вычисляется параметр рассогласования, который и определяет такое управление текущими значениями  $P_{брлс}$ ,  $T_{обл}$ ,  $T_{кн}$ , при котором рассогласование сводится к нулю.

Информационное обеспечение для реализации данного метода представляет собой измененные значения дальности.

### Техническая реализация метода

Для определенности принята ситуация, приведенная на рисунке 1, когда количество истре-

бителей равно двум, то есть система БРЛС также состоит из двух БРЛС (БРЛС1 и БРЛС2), причем БРЛС1 – это БРЛС самолета-лидера.

На рисунке 3 приведена система из двух БРЛС двух истребителей группы, которая функционирует следующим образом.

С помощью задающих генераторов 1.1, 1.2, синхронизаторов 2.1, 2.2 и модуляторов 3.1, 3.2 каждой из двух БРЛС формируются высокочастотные последовательности зондирующих импульсов, которые усиливаются в усилителях мощностей высокой частоты 4.1, 4.2 с управляемыми коэффициентами усиления и через антенные переключатели 5.1, 5.2, антенны 6.1, 6.2

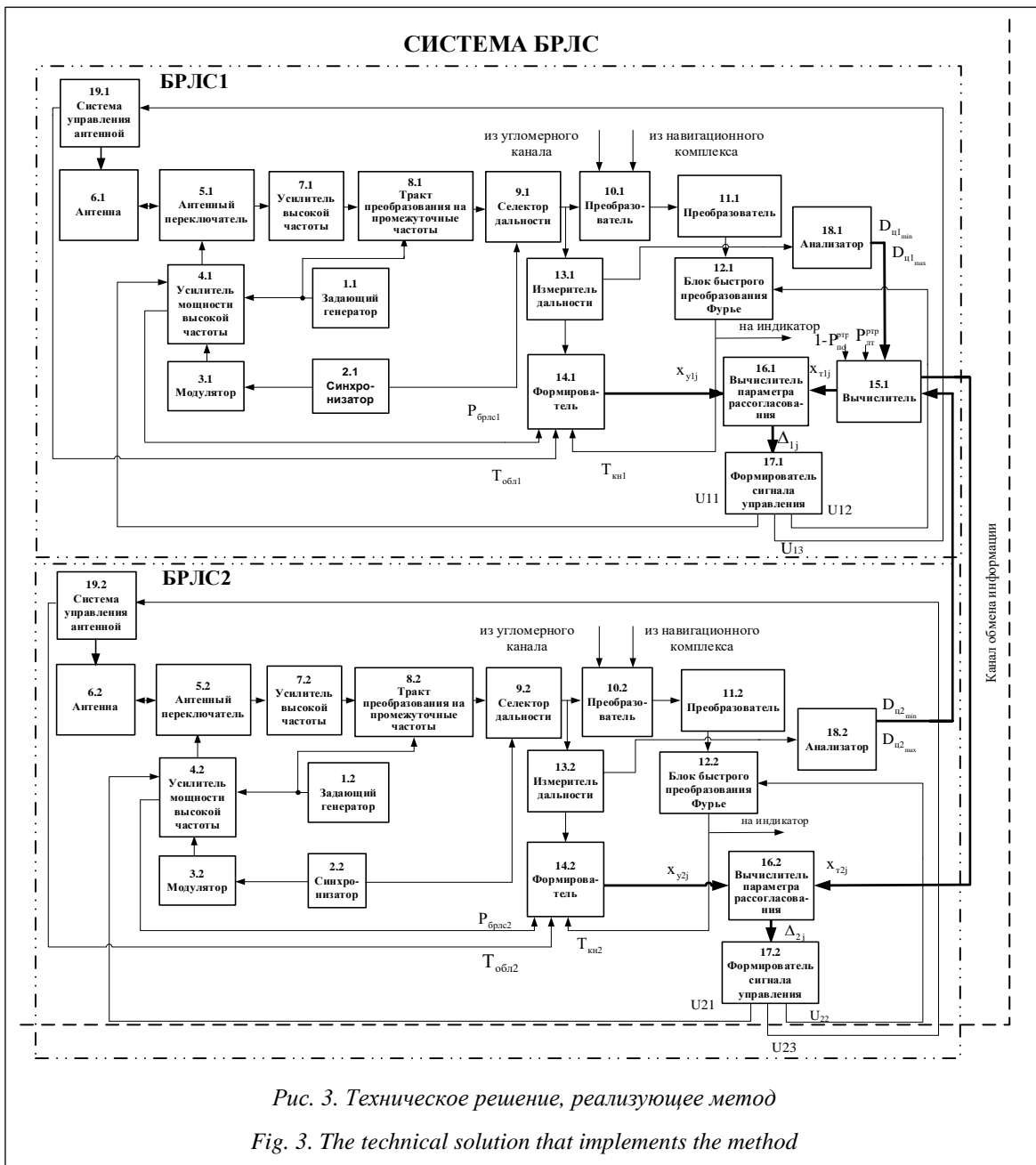


Рис. 3. Техническое решение, реализующее метод

Fig. 3. The technical solution that implements the method

излучаются в направлении двух самолетов противника, каждый из которых оснащен станцией РТР.

Отраженные от самолетов противника сигналы принимаются антеннами 6.1, 6.2 и через антенные переключатели 5.1, 5.2 поступают в приемники БРЛС1 и БРЛС2, в которых усиливаются в усилителях 7.1, 7.2 высокой частоты, преобразуются в трактах 8.1, 8.2 преобразования на промежуточные частоты, селективируются по дальности в селекторах 9.1, 9.2 дальности с помощью селекторных импульсов, поступающих на их вход с выхода синхронизаторов 2.1, 2.2. В измерителях дальности 13.1, 13.2 измеряются значения дальности до каждого самолета противника, которые поступают в анализаторы 18.1, 18.2, где определяются максимальная и минимальная дальности до каждого самолета противника. Истребителем-лидером назначается первый истребитель с его БРЛС1, в состав которой входит анализатор 18.1. С БРЛС2 второго истребителя, в состав которой входит анализатор 18.2, значения максимальной  $D_{ц2_{\max}}$  и минимальной  $D_{ц2_{\min}}$  дальностей от второго истребителя до каждого самолета противника через канал обмена информацией поступают на вход вычислителя 15.1, входящего в состав БРЛС1 первого истребителя-лидера.

В преобразователях 10.1 и 10.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, на входы которых поступают значения углов ориентации диаграмм направленности антенн в вертикальной и горизонтальной плоскостях с выходов угломерных каналов (на схеме не показаны) и значения собственных скоростей носителей БРЛС с выходов навигационных комплексов (на схеме не показаны), осуществляется селекция сигналов по доплеровским частотам. В преобразователях 11.1 и 11.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, сигналы из аналоговой формы преобразуются в цифровую форму, поступают на входы блоков быстрого преобразования Фурье 12.1 и 12.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, где осуществляется их спектральный анализ, и с их выходов – на индикаторы соответствующих БРЛС1 и БРЛС2.

Одновременно на вход вычислителя 15.1 БРЛС1 поступают:

- с канала обмена информацией с выхода БРЛС2 второго истребителя значения максимальной  $D_{ц2_{\max}}$  и минимальной  $D_{ц2_{\min}}$  дальностей от второго истребителя до каждого самолета противника;

- с выхода анализатора 18.1 БРЛС1 значения максимальной  $D_{ц1_{\max}}$  и минимальной  $D_{ц1_{\min}}$

дальностей от первого истребителя-лидера до каждого самолета противника;

- заданная вероятность обеспечения скрытности работы системы из двух БРЛС на излучение ( $P_{\text{зад}} = 1 - P_{\text{по}}^{\text{РТР}}$ ) и вероятность  $P_{\text{лт}}^{\text{РТР}}$  ложного обнаружения излучения системы БРЛС станциями РТР.

В вычислителе 15.1 БРЛС1 в соответствии с выражениями (1)–(7) рассчитываются требуемые значения управляемых параметров

$$x_{tij} = \left[ P_{\text{брлс}i}^{\text{РТР}}, T_{\text{обл}i}^{\text{РТР}}, T_{\text{кн}i}^{\text{РТР}} \right]^T.$$

Причем значения  $x_{T1j}$  поступают на вход вычислителя параметра рассогласования 16.1 БРЛС1 первого истребителя-лидера, а значения  $x_{T2j}$  – в канал обмена информацией для его передачи на вход вычислителя параметра рассогласования 16.2 БРЛС2 второго истребителя. На вторые входы вычислителей параметров рассогласования 16.1 и 16.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, поступают текущие значения управляемых параметров  $x_{T1j}$  и  $x_{T2j}$  в БРЛС1 и БРЛС2 соответственно. Значения управляемых параметров  $x_{yij}$  формируются в формирователях управляемых параметров 14.1 и 14.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, на основе текущих значений управляемых параметров  $P_{\text{брлс}i}$ ,  $T_{\text{обл}i}$  и  $T_{\text{кн}i}$  функционирования БРЛС1 и  $P_{\text{брлс}2}$ ,  $T_{\text{обл}2}$  и  $T_{\text{кн}2}$  функционирования БРЛС2, поступающих на их входы соответственно с выходов усилителей мощности высокой частоты 4.1 и 4.2, систем управления антенн 19.1 и 19.2 и блоков 12.1 и 12.2 (в которых время когерентного накопления  $T_{\text{кн}}$  обратно пропорционально эквивалентной полосе пропускания одного бина алгоритма БПФ), соответственно БРЛС1 и БРЛС2. Причем значения управляемых параметров  $x_{yij}$  формируются на выходах формирователей 14.1 и 14.2 только при наличии на их входах сигналов, поступающих с измерителей дальности 13.1 и 13.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, что свидетельствует об обнаружении самолетов противника в БРЛС1 и БРЛС2, а следовательно – и о необходимости обеспечения энергетической скрытности работы на излучение обеих БРЛС1 и БРЛС2.

С выходов вычислителей параметров рассогласования 16.1 и 16.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, значения  $\Delta_{ij}$  поступают на входы формирователей сигналов управления 17.1, 17.2 соответствующих БРЛС1 и БРЛС2, на выходах которых формируются сигналы управления  $U_{11}$ ,  $U_{12}$ ,  $U_{13}$  в БРЛС1 и  $U_{21}$ ,  $U_{22}$ ,  $U_{23}$  в БРЛС2,

пропорциональные параметрам рассогласования  $\Delta_{1j}$  и  $\Delta_{2j}$  соответственно. Данные сигналы управления поступают на входы усилителей мощности высокой частоты 4.1 и 4.2, блоки быстрого преобразования Фурье 12.1 и 12.2 и систем управления антенной 19.1 и 19.2 соответствующих БРЛС1 и БРЛС2. Так, с помощью сигналов управления  $U_{11}$  и  $U_{21}$  в усилителях мощности высокой частоты 4.1 и 4.2, соответственно БРЛС1 и БРЛС2, осуществляется изменение их коэффициентов усиления для изменения мощностей  $P_{брлс1}$  и  $P_{брлс2}$  передатчиков БРЛС1 и БРЛС2, с помощью сигналов управления  $U_{12}$  и  $U_{22}$  в блоках быстрого преобразования Фурье 2.1 и 2.2 осуществляется изменение эквивалентных полос пропускания одного бина алгоритма БПФ (времен  $T_{кн1}$  и  $T_{кн2}$  когерентного накопления сигнала в приемниках БРЛС1 и БРЛС2), а с помощью сигналов управления  $U_{13}$  и  $U_{23}$  в системах 19.1 и 19.2 управления антеннами осуществляется изменение времен  $T_{обл1}$  и  $T_{обл2}$  облучения самолетов против-

ника, соответственно БРЛС1 и БРЛС2. Управление значениями  $P_{брлсi}$ ,  $T_{облi}$  и  $T_{кни}$  (в рассматриваемом примере  $i = 1, 2$ ) будет осуществляться до тех пор, пока параметр рассогласования  $\Delta_{ij}$  ( $j = \overline{1,3}$ ) не достигнет нулевого значения, что и будет свидетельствовать об обеспечении энергетической скрытности с заданной вероятностью работы на излучение системы из БРЛС1 и БРЛС2 двух истребителей при обнаружении двух самолетов противника, оснащенных станциями РТР.

### Выводы

Таким образом, авторами статьи разработан метод функционирования системы импульсно-доплеровских бортовых РЛС при их совместной работе на излучение в интересах скрытного обнаружения группы самолетов противника, оснащенных станциями РТР, а также предложено техническое решение, позволяющее реализовать представленный метод.

### Литература

1. Верба В.С. Системные показатели авиационных радиоэлектронных систем управления // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 4. С 34–39.
2. Верба В.С. Разработка перспективных бортовых РЛС: возможности и ограничения // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 5. С. 11–24. DOI 10.18127/j00338486-201905(I)-03.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
4. Willis N.J. and Griffiths H.D. Advances in bistatic radar. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, vol. 23, no. 7, p. 46. DOI: 10.1109/MAES.2008.4579292.
5. Yang L., Gao H., Li B., Yang Y., Ru G. Joint position and velocity estimation of a moving target in multistatic radar by static range, TDOA, and doppler shifts. International Journal of Antennas and Propagation, 2019, vol. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/4943872.
6. Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса. М.: Радиотехника, 2018. 360 с.
7. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Советское радио, 1962. 244 с.
8. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // Вестн. РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 779–787.
9. Богданов А.В., Коротков С.С., Закомолдин Д.В., Лютиков И.В. Снижение радиолокационной заметности истребителя при работе его бортовой радиолокационной станции на излучение и при ведении противником радиотехнической разведки // Журнал СФУ: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 3. С. 442–447.
10. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
11. Богданов А.В., Голубенко В.А., Закомолдин Д.В., Кочетов И.В., Кучин А.А., Акимов С.И. Способ функционирования импульсно-доплеровской бортовой радиолокационной станции истребителя при обеспечении энергетической скрытности ее работы на излучение: пат. 2694891. Рос. Федерация. № 2019104450; заявл. 18.02.19; опубл. 18.07.19. Бюл. № 20. 3 с.
12. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы. М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
13. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности. М.: Радиотехника, 2005. 304 с.



## Method of functioning of the onboard radar system while ensuring their stealth operation on radiation

A.V. Bogdanov<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Professor

D.V. Zakomoldin<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Doctoral Student, denjuga68@yandex.ru

S.I. Akimov<sup>1</sup>, Adjunct

<sup>1</sup> Military Academy of the Aerospace Defence, Tver, 170022, Russian Federation

**Abstract.** The survivability of a military aircraft depends to a significant extent on the survivability of its on-Board radar station, the main areas of improvement of which are, first, the application of the multi-position principle of building on-Board radars, and secondly, increasing the stealth of its work on radiation.

This paper sets and solves the problem of developing a method that combines these areas of increasing survivability. The application of the multi-position principle is implemented by combining all on-Board radars into a single system controlled by the on-Board radar of the leader aircraft, which is determined in advance and serves as a point for processing radar information received from the on-Board radars of all the group's aircraft and issuing information to all the group's aircraft about the required parameters of their on-Board radars. Secrecy operation of the system of airborne radar at the radiation detection group of enemy aircraft, equipped with electronic intelligence stations, implemented by means of reception on each side of the radar system information from the aircraft-leader about the required parameters, their on-Board radars, namely the values of the average radiation power of the transmitter, the time of coherent accumulation in the receiver and the time of irradiation of air targets and the formation of current data values of managed parameters of the onboard radar so that the difference between the required and current values of the onboard radar parameters is zero.

Held on Board the aircraft-leader calculations given in this paper, the results of these calculations for each on-Board radar systems as well as manage settings of each onboard radar systems allow you to control the signal-noise generated at the input of the receivers of all stations of electronic intelligence of the enemy, and thereby to ensure the secrecy of the operation of the onboard radar system for radiation with a given probability upon detection of a group of enemy aircraft equipped with radio engineering reconnaissance.

**Keywords:** pulse-Doppler airborne radar, fighter, radio intelligent station, stealth operation, parameter control, radiation power, coherent accumulation time, multi-position radar, system.

### References

1. Verba V.S. System performance of airborne radio electronic control system. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2013, no. 4, pp. 34–39 (in Russ.).
2. Verba V.S. Development of advanced airborne radars: potentials and limitations. *Radiotekhnika*, 2019, vol. 83, no. 5, pp. 11–24 (in Russ.). DOI 10.18127/j00338486-201905(I)-03.
3. Chernjak V.S. *Multi-Position Radar*. Moscow, 1993, 416 p. (in Russ.).
4. Willis N.J. and Griffiths H.D. Advances in bistatic radar. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, vol. 23, no. 7, p. 46. DOI: 10.1109/MAES.2008.4579292.
5. Yang L., Gao H., Li B., Yang Y., Ru G. Joint position and velocity estimation of a moving target in multistatic radar by static range, TDOA, and doppler shifts. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, vol. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/4943872.
6. Merkulov V.I., Verba V.S., Ilchuk A.R. *Automatic Target Tracking in the Integrated Aviation System Radar. Theoretical Basis. Radar Station as Part of an Integrated Aviation System*. Moscow, 2018, 360 p. (in Russ.).
7. Ufimtsev P.Ya. *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*. Moscow, 1962, 244 p. (in Russ.).
8. Lagarkov A.N., Pogosyan M.A. Basic and applied problems of stealth technologies. *Bull. RAS*, 2003, vol. 73, no. 9, pp. 779–787 (in Russ.).
9. Bogdanov A.V., Korotkov S.S., Zakomoldin D.V., Lyutikov I.V. Reduce radar visibility fighter in its airborne radar on the emission and maintenance of enemy electronic intelligence. *Journal of SibFU: Engineering and Technologies*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 442–447 (in Russ.).
10. Tikhonov V.I. *Optimal Signal Reception*. Moscow, 1983, 320 p. (in Russ.).
11. Bogdanov A.V., Golubenko V.A., Zakomoldin D.V., Kochetov I.V., Kuchin A.A., Akimov S.I. *Method for Operation of a Pulse-Doppler on-Board Radar Station of a Fighter While Ensuring Energy Security of Its Operation for Emission: Patent RF, no. 2019104450, 2019 (in Russ.)*.

12. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarskij B.G., Ilchuk A.R., Gerasimov A.A. *Aviation Radar Complexes and Systems*. Moscow, 2006, 1112 p. (in Russ.).

13. Melnikov Yu.P. *Airborne Radio Engineering Exploring. Efficiency Assessment Methods*. Moscow, 2005, 304 p. (in Russ.).

#### Для цитирования

Богданов А.В., Закомолдин Д.В., Акимов С.И. Метод функционирования системы бортовых РЛС при обеспечении скрытности их работы на излучение // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 4. С. 651–660. DOI: 10.15827/0236-235X.132.651-660.

#### For citation

Bogdanov A.V., Zakomoldin D.V., Akimov S.I. Method of functioning of the onboard radar system while ensuring their stealth operation on radiation. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 4, pp. 651–660 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.132.651-660.