

Труды МАИ. 2023. № 129  
Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья  
УДК 621.396.96  
DOI: [10.34759/trd-2023-129-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-13)

## **РАЗРАБОТКА СОВМЕСТНОГО ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АВИАЦИОННЫМ СРЕДСТВОМ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

**Иван Дмитриевич Бирюков**

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга,

Москва, Россия

[ivan-birs@yandex.ru](mailto:ivan-birs@yandex.ru)

***Аннотация.*** Описаны основные задачи обработки радиосигналов, решаемые авиационными средствами радиотехнического наблюдения. Показана взаимозависимость принимаемых решений при обнаружении, разрешении, оценке параметров и распознавании радиосигналов источников радиоизлучения. Для случая принадлежности радиосигналов источника радиоизлучения априорной библиотеке типов обоснован порядок выполнения задач обработки. На основе байесовского синтеза разработан алгоритм, в котором решается задача априорной неопределенности за счет изменения последовательности выполнения процедур обработки радиосигналов. Представлена блока схема разработанного алгоритма. Выполнена оценка реализуемости разработанного алгоритма.

**Ключевые слова:** радиотехническое наблюдение, обработка информации, оценка параметров, разрешение, обнаружение, распознавание, байесовский синтез

**Для цитирования:** Бирюков И.Д. Разработка совместного оптимального алгоритма обработки радиосигналов источников радиоизлучения авиационным средством радиотехнического наблюдения // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-13)

Original article

## **DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL ALGORITHM FOR PROCESSING RADIO SIGNALS OF RADIO EMISSION SOURCES BY AVIATION RADIO SURVEILLANCE TOOL**

**Ivan D. Biryukov**

TsNIRTI im. academician A.I. Berg,

Moscow, Russia

[ivan-birs@yandex.ru](mailto:ivan-birs@yandex.ru)

**Abstract.** This paper presents the process of developing an optimal algorithm for processing radio signals from sources of radio emission by an aviation system of radio technical surveillance.

The main tasks of radio signal processing, which are solved by aviation means of radio technical surveillance, are described. The interdependence of the decisions made in the detection, resolution, estimation of parameters and recognition of radio signals from sources of radio emission is shown. An analysis of the factors that reduce the effectiveness of radio surveillance equipment is carried out, and ways to improve it are proposed. For the

case when the source of radio emission belongs to the a priori type library, the procedure for performing processing tasks is substantiated. The loss function is defined, which describes the process of processing information about the received radio signals and provides the interconnection of the decisions made. Based on Bayesian synthesis, an algorithm has been developed in which the problem of a priori uncertainty is solved by changing the sequence of performing radio signal processing procedures. A block diagram of the developed algorithm is presented. The feasibility of the developed algorithm is assessed.

The relevance of the work on the development of an algorithm for processing radio signals in aviation system of radio surveillance is due to the complexity of the modern electronic environment, the increasing importance of objects containing radio emission sources, and the need for effective countermeasures.

The joint optimal algorithm provides the lowest total Bayesian risk, but is not feasible due to high computational costs. Therefore, it is required to make a transition to a joint quasi-optimal algorithm.

**Keywords:** radio technical observation, information processing, parameter estimation, resolution, detection, recognition, Bayesian synthesis

**For citation:** Biryukov I.D. Development of an optimal algorithm for processing radio signals of radio emission sources by aviation radio surveillance tool. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-13)

## Введение

Авиационные средства радиотехнического наблюдения (РТН) по сравнению с другими видами технических систем наиболее приспособлены к решению задач наблюдения источников радиоизлучения (ИРИ) [1]. Они демонстрируют возможность оперативного обнаружения и анализа радиосигналов ИРИ, расположенных на больших дальностях и в широких секторах углового обзора независимо от метеоусловий и времени суток [2-3]. В силу разнообразия и увеличения количества источников радиоизлучения, огромного объёма потока радиосигналов, активного использования различных видов модуляций и широкого диапазона возможных значений радиотехнических параметров, современные авиационные средства радиотехнического наблюдения не всегда обрабатывают радиосигналы оптимально, что может привести к их недостаточной эффективности. [4-5].

В авиационных средствах РТН комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) основными задачами, решаемыми при обработке радиосигналов, являются обнаружение, разрешение, оценивание и распознавание ИРИ [6-7]. В большинстве научных публикаций, посвященных оптимальной обработке радиосигналов, изложение этих задач ведется отдельно [6-10]. В связи с тесной взаимосвязью принимаемых решений при проверке статистических гипотез и оценке параметров, связанных с данными гипотезами, целесообразно решать перечисленные задачи совместно [11] и в определенном порядке. В работе [12] было показано, что наиболее эффективным способом совместной обработки принятых радиосигналов является формирование гипотез в следующем порядке: распознавание, разрешение и оценка параметров радиосигналов.

В авиационных средствах РТН имеется априорная информация о принимаемых радиосигналах, которая хранится в априорной библиотеке. Данная информация используется при решении задачи распознавания сигналов [13] и представляет собой описание радиосигналов в пространстве возможных значений радиотехнических параметров (РТП) в соответствии с режимами работы ИРИ. Поэтому представляется возможным использовать априорную информацию о радиосигналах на этапе их обнаружения [14-16].

В данной работе проведен байесовский синтез совместного оптимального алгоритма обработки радиосигналов для случая принадлежности источника радиоизлучения априорной библиотеке типов при формировании гипотез в следующей последовательности: распознавание, обнаружение, разрешение и оценка параметров радиосигналов.

Разработка алгоритма обработки радиосигналов в авиационных средствах РТН является актуальной задачей в связи с усложнением современной радиоэлектронной обстановки, повышением значения объектов, содержащих ИРИ, и необходимостью эффективного противодействия им [17-18].

### **Основные задачи обработки радиосигналов источников радиоизлучения авиационными средствами радиотехнического наблюдения**

В авиационных средствах РТН решаются задачи обнаружения, разрешения, распознавания радиосигналов и оценка параметров ИРИ [13].

Под обнаружением радиосигналов понимается принятие решения о наличии или отсутствии каждого радиосигнала из множества радиосигналов, информация о параметрах которых поступает на вход системы обработки [14].

Под разрешением радиосигналов понимается принятие решения о принадлежности каждого обнаруженного радиосигнала из множества радиосигналов, информация о параметрах которых поступает на вход системы обработки, к разным ИРИ. В результате выполнения процедуры разрешения из множества обнаруженных радиосигналов формируется несколько подмножеств радиосигналов, излученных одним и тем же ИРИ. Каждый сигнал должен попасть ровно в одно подмножество.

Под распознаванием радиосигналов, содержащих информацию о ИРИ, понимается решение о принадлежности ИРИ, соответствующих каждому радиосигналу из множества радиосигналов, информация о параметрах которых поступает на вход системы обработки, к ИРИ определенного типа из априорной библиотеки типов.

При задании априорных сведений, необходимых при реализации процедуры распознавания радиосигнала ИРИ, полагается, что всё множество радиосигналов, информация о параметрах которых поступает на вход системы обработки, принадлежит априорной библиотеке типов. Указанная библиотека определяется:

– алфавитом типов

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_{N_B}\},$$

где  $N_B$  - число типов в априорной библиотеке;

– распределением вероятностей типов

$$p(B) = \{P_{pr}(B_1), P_{pr}(B_2), \dots, P_{pr}(B_{N_B})\},$$

– алфавитом признаков типов

$$\{a_1, a_2, \dots, a_v, \dots, a_{N_A}\},$$

где  $N_A$  - число доступных измерению признаков, характеризующих тип.

Данный алфавит позволяет описать характеристики радиоизлучающего объекта данного типа как набор значений признаков:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_v, \dots, a_{N_A}]^T;$$

- плотностью распределения вероятностей значений признаков для каждого типа радиоизлучающего объекта

$$P(A|B_s) = p(a_1, a_2, \dots, a_{N_A} | B_s), s = \overline{1, N_B}$$

которая определяется неточностью априорных знаний об истинных значениях признаков конкретных радиосигналов ИРИ и вариативностью признаков, в зависимости от конкретного экземпляра объекта и его режима работы и излучения.

В связи с большим числом трудно учитываемых факторов, определяющих конкретные значения признаков, которые имеют различные представители одного типа, распределение  $p(A|B_s)$  задается в виде произведения равномерных плотностей вероятностей значений этих признаков в известных диапазонах их значений.

Под оценкой параметров ИРИ понимается определение вектора оцененных радиотехнических и пространственно-временных параметров каждого ИРИ, которому соответствует подмножество сигналов, полученных от одного ИРИ. Примеры таких параметров: длительность импульса, межимпульсный интервал,

несущая частота, ширина спектра, время приема радиосигнала, вид и глубина модуляции, направление на ИРИ.

### **Взаимозависимость принимаемых решений при обнаружении, разрешении, распознавании радиосигналов и оценке параметров ИРИ**

Проанализируем, как принятие решения частных задач влияет на принятие решения остальных задач.

Если решена задача распознавания, то информация о типе ИРИ сигналов влияет на все остальные задачи. Эффективность обнаружения повышается за счет формирования обнаружителя с учетом параметров радиосигналов ИРИ [15-16]. Так как сигналы разных типов ИРИ не могут быть излучены одним ИРИ, задача разрешения сильно упрощается и разбивается на разрешение радиосигналов внутри подмножества сигналов, излученных ИРИ одинакового типа. Оценка параметров ИРИ будет учитывать не только апостериорную информацию о сигнале, но и априорную информацию  $p(A|B_s)$ . В частности, при использовании описанной выше априорной библиотеки, известная информация о типе не позволит оценке параметров выйти из диапазона допустимых значений признаков типа [19-20].

Если задача обнаружения радиосигнала решена неверно, то это может привести к неправильному принятию решения о его принадлежности к одной из ранее принятой групп радиосигналов ИРИ, или к формированию ложной новой группы.

Оценка параметров радиосигналов оказывает непосредственное влияние на результат его распознавания. При неправильном оценивании радиосигнал может быть отнесен к ИРИ другого типа из априорной библиотеки



Ввиду описанного выше, решения частных задач взаимосвязаны, поэтому оптимальным решением всех задач может быть только совместное их решение [11].

На этапе синтеза процедуры обработки радиосигналов, взаимосвязь решений, принимаемых при обнаружении, разрешении и распознавании сигналов и оценивании параметров ИРИ, учитывается путем использования байесовского метода синтеза и введения соответствующей составной функции потерь, которая устанавливает связь между различными процедурами принятия решений. Совместный синтез алгоритмов на основе данного подхода обеспечивает меньший суммарный байесовский риск, чем алгоритмы, решающие не все четыре процедуры обработки радиосигналов совместно [11]. Это позволяет существенно сократить структурную избыточность авиационных средств РТН, за счёт учёта при синтезе связей между решаемыми задачами, исключить априорную неопределенность при обнаружении [15-16] и разрешении [12] радиосигналов, тем самым увеличив эффективность работы алгоритма.

При задании составной функции потерь учитывается необходимость реализуемости алгоритма обработки, предполагается, что шумы наблюдения радиотехнических параметров имеют нормальный закон распределения, физическая сущность каждой из решаемых задач и их взаимосвязь. В связи с этим составная функция потерь представляется в виде:

$$\begin{aligned} \Pi(T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|dn}, \hat{\Lambda}_{r|dn}, T_m, D_{b|m}, \Gamma_{q|bm}, \Lambda_{q|bm}) = & C_T (1 - \delta_{nm}) + \delta_{nm} C_D (1 - \delta_{db}) + \\ & + \delta_{nm} \delta_{db} C_\Gamma (1 - \delta_{rq}) + \delta_{nm} \delta_{db} \delta_{rq} C_\Lambda (1 - \delta(\hat{\Lambda} - \Lambda)) \end{aligned} \quad (1)$$

где T, D,  $\Gamma$  – условное обозначение гипотез (процедур) соответственно распознавания, обнаружения, разрешения радиосигналов;

$\Lambda, \hat{\Lambda}$  – условное обозначение множества векторов истинных и оцененных параметров ИРИ;

$C_T, C_D, C_r, C_\Lambda$  – коэффициенты потерь выполнения соответствующих процедур;

$\delta_{xy}$  – символ Кронекера,  $\delta_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{если } x = y \\ 0, & \text{если } x \neq y \end{cases}$ ;

$n, m; d, b; r, q$  – индексы означающие номер гипотезы о распознавании; об обнаружении; о разрешении соответственно;

$|$  – знак условности, обозначающий условные зависимости, например  $D_{d|n} = D_d | T_n$ .

Функция потерь  $\Pi(T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|dn}, \hat{\Lambda}_{r|dn}, T_m, D_{b|m}, \Gamma_{q|bm}, \Lambda_{qbm})$  определяет потери при принятии решения в пользу  $n$ -ой гипотезы о распознавании,  $d$ -ой гипотезы об обнаружении,  $r$ -ой гипотезы о разрешения и оценки  $\hat{\Lambda}_{r|dn}$  параметров ИРИ, когда на самом деле справедливы гипотезы:  $m$ -ая гипотеза о распознавании,  $b$ -ая гипотеза об обнаружении,  $q$ -ая гипотеза о разрешении и параметры ИРИ  $\Lambda_{qbm}$ .

На рисунке 1 представлено дерево гипотез о распознавании, на рисунке 2 представлено дерево гипотез об обнаружении радиосигналов известных типов, соответствующих гипотезе  $T_n$ , на рисунке 3 представлено одно из  $N_B$  деревьев гипотез о разрешении наблюдений, соответствующих гипотезам  $T_n$  и  $D_{d|n}$ .

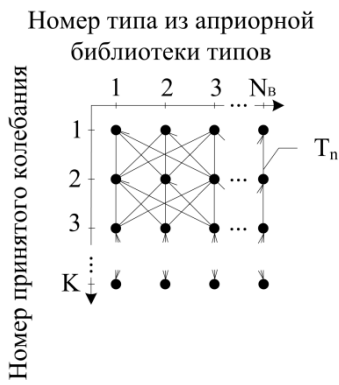


Рис. 1

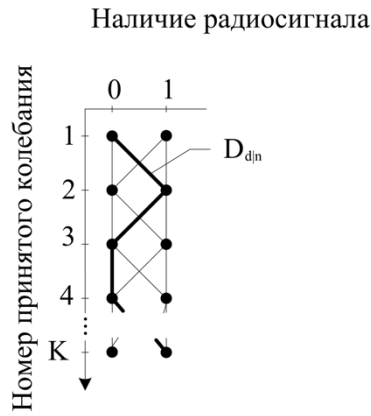


Рис. 2

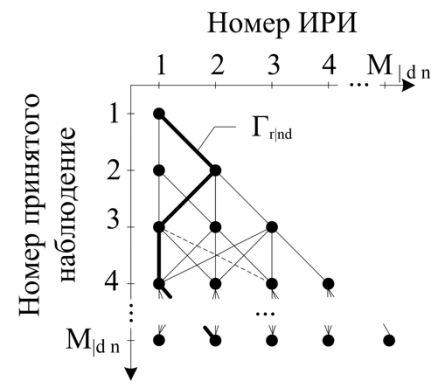


Рис. 3

## Разработка алгоритма обработки радиосигналов

Пусть на интервале времени  $(t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}})$  принято дискретное множество радиосигналов  $\{\xi_k\}$  от различных радиоизлучающих объектов или только шум.

$$\{\xi_k\} = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_K\} \quad (2)$$

Значения  $\xi_k$  наблюдаемого на входе системы обработки в моменты времени  $t_k$  представляют собой аддитивную смесь полезного радиосигнала  $S(t_k, \lambda_{k|i})$  и дискретного шума наблюдения  $n_k$  [21]:

$$\xi_k = \Theta S(t_k, \lambda_{k|i}) + n_k, \quad (3)$$

где  $\Theta$  – случайная величина, описывающая наличие полезного сигнала принятого колебания

$\lambda_{k|i}$  – вектор параметров  $i$ -го ИРИ, от которого в момент времени  $t_k$  принято колебание;

$S(t_k, \lambda_{ki})$  – полезный радиосигнал, под которым понимается некоторая векторная функция, компоненты которой определяют измеренные значения параметров радиосигнала от  $i$ -го радиоизлучающего объекта с вектором параметров  $\lambda_{ki}$  при полном отсутствии ошибок измерений.

Требуется для конкретной реализации  $\{\xi_k\}$ :

- определить принадлежность к одному из типов априорной библиотеки ( $N_B$ );
- определить факт наличия сигнала (оценить величину  $\Theta$ );
- принять решение о принадлежности каждого радиосигнала к определенному подмножеству радиосигналов, полученных от одного ИРИ;
- оценить вектор параметров  $\lambda_{ki}$  каждого ИРИ, которому соответствует разрешенное подмножество сигналов.

Описанные задачи можно решить оптимально путем проведения байесовского синтеза совместного решающего правила соответствующих задач.

При проведении байесовского синтеза совместное решающее правило об обнаружении, разрешении, распознавании и оценивании находится путем минимизации апостериорного риска

$$\left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|d n}, \hat{\Lambda}_{|r d n} \right) = \arg \min \left( R_{ps} \left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|d n}, \hat{\Lambda}_{|r d n} \right) \right), \quad (4)$$

$$d \in \{0; N_D\}, r \in \{1; L_v\}, n \in \{1; N_T\}, \hat{\Lambda} \in \Lambda(r)$$

где  $R_{ps} \left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|d n}, \hat{\Lambda}_{|r d n} \right) = R \left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|d n}, \hat{\Lambda}_{|r d n} | \{\xi_k\} \right)$  – апостериорный риск;

$N_D$  – общее число гипотез об обнаружении;

$L_v$  – общее число гипотез о разрешении;

$N_T$  – общее число гипотез о распознавании;

$\Lambda(r)$  – множество векторов оценённых параметров радиосигналов.

$L_v = L_v(n)$  – общее число гипотез о разрешении, количество и состав деревьев гипотез разрешения определяется выбранной гипотезой распознавания (см. рис. 3);

$\Lambda = \Lambda(r, n)$  – множество векторов оценённых параметров ИРИ, то для каких ИРИ производится оценка параметров зависит от выбранной гипотезы разрешения, но не только от номера  $r$ , но и от  $n$ , так как смысл гипотезы разрешения  $r$  меняется если меняется  $n$ .

Апостериорный риск:

$$R_{ps} \left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|dn}, \hat{\Lambda}_{|rdn} \right) = \sum_{m=1}^{N_T} P_{ps} \left( T_m \right) \sum_{b=0}^{N_D} P_{ps} \left( D_{b|m} \right) \sum_q^{L_v} P_{ps} \left( \Gamma_{q|b m} \right) \iint_{\Lambda} P_{ps} \left( \Lambda_{|mbq} \right) \cdot \Pi \left( T_n, D_{d|n}, \Gamma_{r|dn}, \hat{\Lambda}_{|rdn}, T_m, D_{b|m}, \Gamma_{q|b m}, \Lambda_{|mbq} \right) d\Lambda, \quad (5)$$

где  $P_{ps} \left( T_m \right), P_{ps} \left( D_{b|m} \right), P_{ps} \left( \Gamma_{q|b m} \right)$  – апостериорная вероятность гипотезы о распознавании, об обнаружении, о разрешении соответственно;

$P_{ps} \left( \Lambda_{|mbq} \right)$  – апостериорная плотность вероятности параметров ИРИ.

Подставив (1) в (5) и упростив, получим апостериорный риск вида:

$$R_{ps} \left( \cdot \right) = C_T + P_{ps} \left( T_n \right) \left[ -C_T + C_D + P_{ps} \left( D_{d|n} \right) \left[ -C_D + C_\Gamma + P_{ps} \left( \Gamma_{r|dn} \right) \left[ -C_\Gamma + C_\Lambda - C_\Lambda P_{ps} \left( \hat{\Lambda}_{|rdn} \right) \right] \right] \right] \quad (6)$$

Синтез алгоритма обработки включает в себя четыре этапа. На первом этапе минимизации  $R_{ps} \left( \cdot \right)$  фиксируются номера гипотез о распознавании, об обнаружении и о разрешении. Для этого набора номеров гипотез определяется условная оптимальная оценка вектора параметров радиосигналов:

$$\hat{\Lambda}_{\sigma|rdn} = \arg \sup_{\hat{\Lambda}_{|rdn} \in \Lambda} \left( P_{ps} \left( \hat{\Lambda}_{|rdn} \right) \right) \quad (7)$$

На втором этапе минимизации  $R_{ps}(\cdot)$  фиксируются номера гипотез о распознавании и об обнаружении. Для этого набора номеров гипотез находится условное оптимальное решение о разрешении  $r_{\sigma}$ .  $r = r_{\sigma}$  если  $\forall q$ :

$$P_{ps}(\Gamma_{r|dn}) \geq P_{ps}(\Gamma_{q|dn}) \frac{-C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|qdn})}{-C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|rdn})}, \quad (8)$$

при известных оценках  $\hat{\Lambda}_{\sigma|rdn}$  и  $\hat{\Lambda}_{\sigma|qdn}$ , полученных на первом этапе.

На третьем этапе минимизации  $R_{ps}(\cdot)$  фиксируется номер гипотезы о распознавании. Для этого номера гипотезы находится условное оптимальное решение об обнаружении радиосигналов,  $d_{\sigma}$ .  $d = d_{\sigma}$  если  $\forall b$ :

$$P_{ps}(D_{d|n}) \geq P_{ps}(D_{b|n}) \frac{-C_D + C_{\Gamma} - P_{ps}(\Gamma_{q_{\sigma}|bn}) \left( -C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|q_{\sigma}|bn}) \right)}{-C_D + C_{\Gamma} - P_{ps}(\Gamma_{r_{\sigma}|dn}) \left( -C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|r_{\sigma}|dn}) \right)}, \quad (9)$$

при известных оценках,  $\hat{\Lambda}_{\sigma|r_{\sigma}|dn}$  и  $\hat{\Lambda}_{\sigma|q_{\sigma}|bn}$  и гипотезах  $\Gamma_{q_{\sigma}|bn}$  и  $\Gamma_{r_{\sigma}|dn}$ , полученных на первом и втором этапах соответственно.

На четвертом этапе минимизации  $R_{ps}(\cdot)$  найти оптимальное решение о распознавании радиосигнала,  $n_{\sigma}$ .  $n = n_{\sigma}$  если  $\forall m$ :

$$P_{ps}(T_n) \geq P_{ps}(T_m) \frac{-C_T + C_D + P_{ps}(D_{b_{\sigma}|m}) \left( -C_D + C_{\Gamma} - P_{ps}(\Gamma_{q_{\sigma}|b_{\sigma}|m}) \left( -C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|q_{\sigma}|b_{\sigma}|m}) \right) \right)}{-C_T + C_D + P_{ps}(D_{d_{\sigma}|n}) \left( -C_D + C_{\Gamma} - P_{ps}(\Gamma_{r_{\sigma}|d_{\sigma}|n}) \left( -C_{\Gamma} + C_{\Lambda} - C_{\Lambda} P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|r_{\sigma}|d_{\sigma}|n}) \right) \right)} \quad (10)$$

при известных оценках,  $\hat{\Lambda}_{\sigma|q_{\sigma}|b_{\sigma}|m}$  и  $\hat{\Lambda}_{\sigma|r_{\sigma}|d_{\sigma}|n}$ , гипотезах  $\Gamma_{q_{\sigma}|b_{\sigma}|m}$ ,  $\Gamma_{r_{\sigma}|d_{\sigma}|n}$ ,  $D_{b_{\sigma}|m}$ ,  $D_{d_{\sigma}|n}$  полученных на первом, втором и третьем этапах соответственно.

Таким образом, используя выражения (7) – (10) определяется оптимальное решение задач распознавания, обнаружения, разрешения радиосигналов и оценки параметров ИРИ.

### Структурная схема и порядок работы алгоритма

Рассмотрим порядок работы алгоритма по структурной схеме, изображенной на рисунке 4:

- 1) Сформировать все гипотезы  $T_n$ , рассчитать для каждой из них  $P_{ps}(T_n)$ .
- 2) Для каждой гипотезы  $T_n$  сформировать все варианты гипотез  $D_{d|n}$ , определить  $P_{ps}(D_{d|n})$ .
- 3) Для каждой гипотезы  $D_{d|n}$  сформировать все варианты гипотез  $\Gamma_{r|dn}$ , определить  $P_{ps}(\Gamma_{r|dn})$ .
- 4) Для каждой гипотезы  $\Gamma_{r|dn}$  рассчитать  $\hat{\Lambda}_{\sigma|rdn}$  по формуле (7), определить  $P_{ps}(\hat{\Lambda}_{\sigma|rdn})$ .
- 5) Для каждой гипотезы  $D_{d|n}$  найти  $\Gamma_{r_5|dn}$  по (8).
- 6) Для каждой гипотезы  $T_n$  найти  $D_{d_5|n}$  по (9).
- 7) Найти  $T_{n_5}$  по (10) – решение задачи распознавания радиосигналов.
- 8) Выбрать  $D_{d_5|n_5}$  – решение задачи обнаружения радиосигналов.
- 9) Выбрать  $\Gamma_{r_5|d_5n_5}$  – решение задачи разрешения радиосигналов.
- 10) Выбрать  $\hat{\Lambda}_{\sigma|r_5d_5n_5}$  – решение задачи оценки параметров ИРИ.

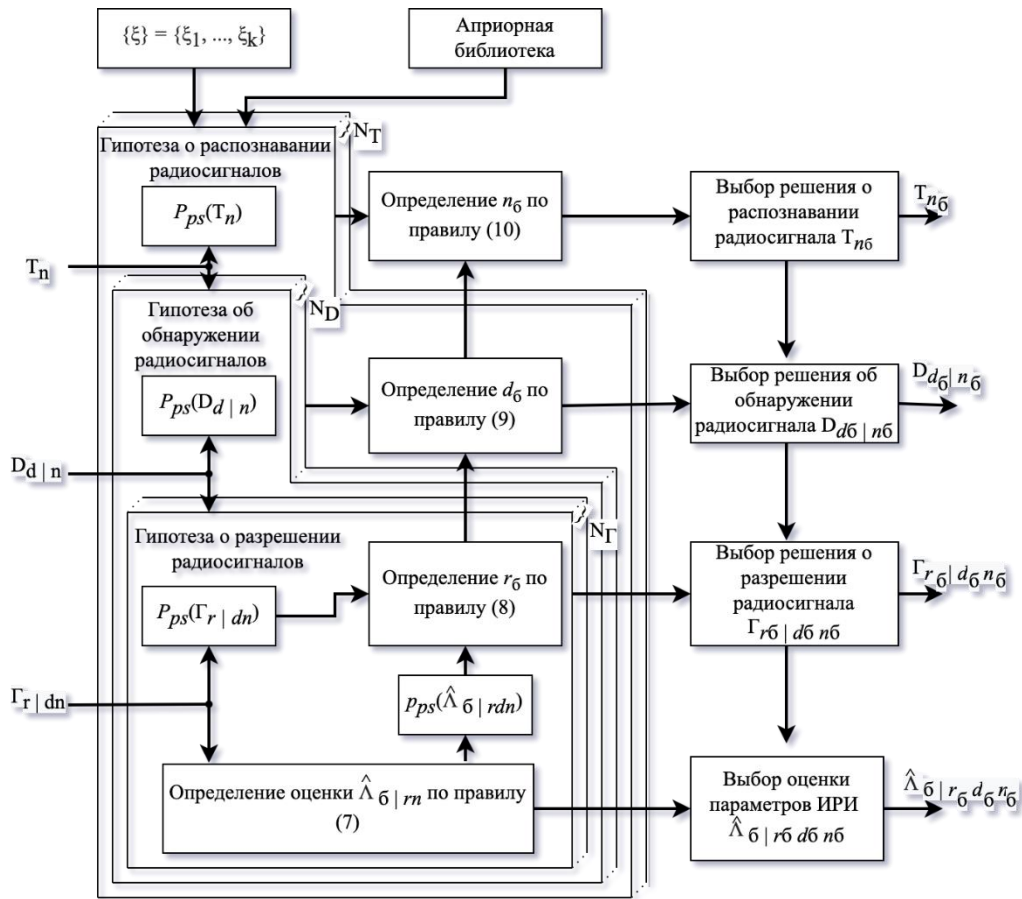


Рис. 4. Блок схема совместного алгоритма обработки радиосигналов

### Оценка реализуемости разработанного алгоритма

В процессе работы алгоритма при получении  $K$  радиосигналов формируется  $N_T$  гипотез о распознавании  $N_T = N_B^K$ , и осуществляется вычисление их апостериорных вероятностей.

Для каждой гипотезы о распознавании формируется  $N_D$  гипотез об обнаружении:  $N_D = 2^K$  и осуществляется вычисление их апостериорных вероятностей.

Для каждой гипотезы об обнаружении формируется  $L_v$  гипотез о разрешении:

$$L_v = \sum_{r=1}^{L_{v-1}} (I_{v-1|dn} + 1), \quad (11)$$

где  $v$  – номер наблюдения;



$L_{\nu-1}$  – число гипотез разрешения, сформированных при получении наблюдения с номером  $\nu$ ;

$I_{\nu-1|dn}$  – число источников излучения при получении  $\nu-1$  наблюдения при номере гипотезы об обнаружении  $d$  и номера гипотезы о распознавании  $n$ .

В силу расходящегося характера ветвлений дерева гипотез о разрешении алгоритм предполагает проведение вычисления большого числа апостериорных вероятностей этих гипотез и оценки параметров, для каждой из гипотез о распознавании и обнаружении.

Общее число формируемых гипотез определяется выражением  $N=N_T N_D L_\nu$ .

При числе типов в априорной библиотеке  $N_B = 32$ , для  $K$  принятых радиосигналов, общее число формируемых гипотез представлено на рисунке 5.

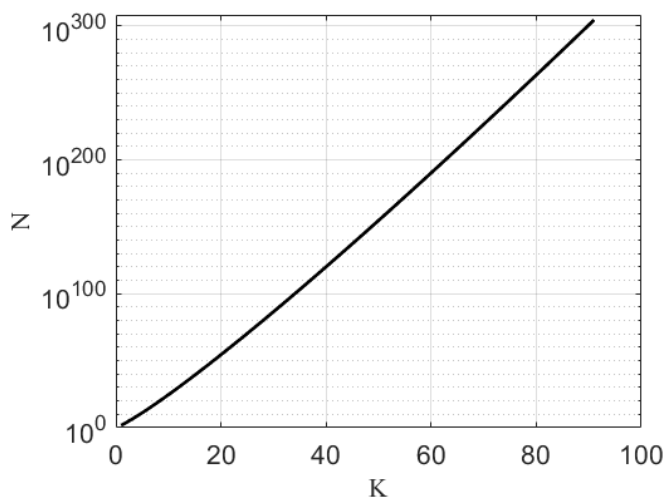


Рис. 5. Зависимость общего числа формируемых гипотез от  $K$  принятых колебаний при числе типов в априорной библиотеке  $N_B = 32$

В связи с экспоненциальным ростом общего числа формируемых гипотез оптимальный алгоритм требует больших вычислительных затрат и практически не

реализуем, поэтому представляет интерес разработка квазиоптимального совместного алгоритма обработки радиосигналов ИРИ с контролем его эффективности на каждом этапе принятых допущений.

### **Заключение**

В данной работе были рассмотрены основные задачи обработки принятых радиосигналов источников радиоизлучения в авиационных средствах РТН. Проанализированы факторы, способствующие снижению эффективности авиационных средств РТН, а также предложены пути её повышения

В работе была определена функция потерь, которая описывает процесс обработки информации о принятых радиосигналах, обеспечивая взаимосвязь между принимаемыми решениями на этапах распознавания, обнаружения, разрешения радиосигналов и оценивания параметров ИРИ. Был проведен байесовский синтез оптимального совместного алгоритма обработки радиосигналов, позволяющего решать указанные задачи. Построена блок-схема данного алгоритма.

Совместный оптимальный алгоритм обработки радиосигналов обеспечивает наименьший суммарный байесовский риск, однако его реализация затруднительна из-за больших вычислительных затрат. Таким образом, требуется перейти к совместному квазиоптимальному алгоритму обработки радиосигналов.

### **Список источников**

1. Бирюков И.Д. Разработка оптимального алгоритма обработки радиосигналов источников радиоизлучения авиационным средством радиотехнического наблюдения

- // XV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 21-23 ноября 2022): сборник трудов. – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2022. С. 54-59.
2. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы и средства. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. - 492 с.
  3. Азаров А.В., Караваев М.Н., Рожков С.С. и др. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165549>. DOI 10.34759/trd-2022-123-12
  4. Бельский А.Б. Требования к бортовым оптико-электронным средствам воздушной разведки летательных аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165561>. DOI 10.34759/trd-2022-123-16
  5. Ананьев А.В., Иванников К.С. Динамическая модель оценки эффективности сценариев ведения воздушной разведки интегрированным пространственно-распределенным разведывательным авиационным комплексом // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164268>. DOI 10.34759/trd-2022-122-16.
  6. Лихачев В.П., Семенов В.В., Веселков А.А., Демчук А.А. Обобщенный алгоритм радиотехнического мониторинга РЛС с синтезированной апертурой антенны // XVI Международная научно-методическая конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 11-12 февраля 2016): сборник трудов. - Воронеж: Изд-во Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 179 - 184.
  7. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 303 с.

8. Heunis S., Paichard Y., Inggs M. Passive radar using a software-defined radio platform and opensource software tools // IEEE National Radar Conference - Proceedings (RADAR), 2011, pp. 879-884. DOI:10.1109/RADAR.2011.5960663
9. Солдатов А.Л. Многоэтапные преобразования и модовая декомпозиция в задачах анализа и классификации радиолокационных сигналов от малоподвижных целей // Гагаринские чтения - 2020 (Москва, 27 декабря 2019 - 17 апреля 2020): тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2020. С. 647-648.
10. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденков А.В., Островский А.С. Оценка характеристики обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
11. Харченко В.П., Косенко Г.Г., Кукуш А.Г. Байесовская теория совместного разрешения, обнаружения, оценивания и распознавания радиосигналов // Радиоэлектроника. 1994. № 3. С. 52–59.
12. Фадеев Е.В. Алгоритмы обработки принятых радиосигналов в авиационных системах радиоэлектронного наблюдения // Вестник РАЕН. 2021. Т. 21. № 4. С. 11-19. DOI: [10.52531/1682-1696-2021-21-4-11-19](https://doi.org/10.52531/1682-1696-2021-21-4-11-19)
13. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Военное изд-во, 2001. – 456 с.
14. Бирюков И.Д. Исследование влияния априорно известных частотно-временных характеристик сигнала на характеристики обнаружения в аппаратуре радиоэлектронного наблюдения // 21 международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 21-25 ноября 2022): тезисы докладов. – М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 282-284.

15. Бирюков И.Д., Бучучан П.В., Тимошенко П.И. Алгоритмы обработки информации в авиационных системах радиоэлектронного наблюдения // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2020. Т. 12. С. 517-529. DOI: [10.17725/rensit.2020.12.517](https://doi.org/10.17725/rensit.2020.12.517)
16. Бирюков И.Д., Силин С.И. Предложения по разработке квазиоптимального алгоритма обнаружения радиосигналов источников радиоизлучения в авиационных системах // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 25-27 ноября 2019): сборник трудов. - М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2019. С. 133-137.
17. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. - М.: Вузовская книга, 2007. - 356 с.
18. Орешкин В.И., Мелёшин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=161424>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-10
19. Подстригаев А.С., Смоляков А.В. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при многосигнальном воздействии // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165560>. DOI 10.34759/trd-2022-123-15
20. Подстригаев А.С., Смоляков А.В. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при односигнальном воздействии // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162661>. DOI 10.34759/trd-2021-121-14

21. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. - М.: Советское радио, 1977. - 432 с.

## References

1. Biryukov I.D. *XV Vserossiiskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»*: sbornik trudov. Moscow, IRE im. V.A. Kotel'nikova RAN, 2022, pp. 54-59.
2. Rembovskii A.M. *Radiomonitoring: zadachi, metody i sredstva* (Radio monitoring), Moscow, Goryachaya linyaya-Telekom, 2006, 492 p.
3. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S. et al. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165549>. DOI 10.34759/trd-2022-123-12
4. Bel'skii A.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165561>. DOI 10.34759/trd-2022-123-16
5. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164268>. DOI 10.34759/trd-2022-122-16
6. Likhachev V.P., Semenov V.V., Veselkov A.A., Demchuk A.A. *XVI Mezhdunarodnaya nauchno-metodicheskaya konferentsiya «Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii»*: sbornik trudov. Voronezh, Izd-vo Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2016, pp. 179 - 184.
7. Sosulin Yu.G. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii i radionavigatsii* (Theoretical foundations of radar and radio navigation), Moscow, Radio i svyaz', 1992, 303 p.

8. Heunis S., Paichard Y., Inggs M. Passive radar using a software-defined radio platform and opensource software tools, *IEEE National Radar Conference - Proceedings (RADAR)*, 2011, pp. 879-884. DOI:10.1109/RADAR.2011.5960663
9. Soldatov A.L. *Gagarinskie chteniya – 2020: tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo MAI, 2020, pp. 647-648.
10. Sel'vesyuk N.I., Veselov Yu.G., Gaidenkov A.V., Ostrovskii A.S. *Trudy MAI*, 2018, no 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100782>
11. Kharchenko V.P., Kosenko G.G., Kukush A.G. *Radioelektronika*, 1994, no. 3, pp. 52–59.
12. Fadeev E.V. *Vestnik RAEN*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 11-19. DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-4-11-19
13. Smirnov Yu.A. *Radiotekhnicheskaya razvedka* (Electronic intelligence), Moscow, Voennoe izd-vo, 2001, 456 p.
14. Biryukov I.D. *21 mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika»: tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo «Pero», 2022, pp. 282-284.
15. Biryukov I.D., Buchuchan P.V., Timoshenko P.I. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii*, 2020, vol. 12, pp. 517-529. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.517
16. Biryukov I.D., Silin S.I. *XIII Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»: sbornik trudov*, Moscow, IRE im. V.A. Kotel'nikova RAN, 2019, pp. 133-137.
17. Kupriyanov A.I., Sakharov A.V. *Teoreticheskie osnovy radioelektronnoi bor'by* (Theoretical foundations of electronic warfare), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2007, 356 p.

18. Oreshkin V.I., Meleshin Yu.M., Tsvetkov V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161424>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-10
19. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165560>. DOI 10.34759/trd-2022-123-15
20. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162661>. DOI 10.34759/trd-2021-121-14
21. Repin V.G, Tartakovskii G.P. *Statisticheskii sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh system* (Statistical synthesis under a priori uncertainty and adaptation of information systems), Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 432 p.

Статья поступила в редакцию 02.03.2023

Одобрена после рецензирования 17.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 02.03.2023; approved after reviewing on 17.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023