

УДК 621.396

## СОВМЕСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ ПЕЛЕНГАТОРЕ С ОРТОГОНАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПРИЕМНЫМИ КАНАЛАМ

*Башкова М. А., студент гр.145201/магистрант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Козлов С. В. – доктор тех. наук, доцент*

**Аннотация.** Изложены основные положения методики для построения алгоритма совместного оценивания угловых координат и поляризационных параметров источника излучения для пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами, размещенными на криволинейной поверхности. Приведены результаты, иллюстрирующие работоспособность методики.

**Ключевые слова.** Пеленгатор, поляризация, поляризационные параметры радиосигналов, градиент, алгоритм оценивания, функция правдоподобия, адаптивный байесовский подход, радиопеленгация, поляризационно-чувствительный пеленгатор, угловые координаты источника радиоизлучения.

Постановка задачи. Актуальным в практике радиомониторинга становится совместное оценивание угловых координат и поляризационных параметров источника радиоизлучения при произвольной геометрии пеленгационной антенной системы [1-5]. В [1] приведен вариант геометрии антенной системы (АС) в виде множества ортогональных пар диполей или других антенных элементов с приближенно ортогональными поляризациями и выражение для функции правдоподобия. Оценка параметров сигналов для указанной ФП должна проводиться по 6 параметрам: комплексной амплитуде принимаемого сигнала (амплитуде и фазе сигнала на выходе изотропной приемной антенны), двум угловым координатам и двум поляризационным параметрам методом полного перебора. Это не реализуемо в реальном масштабе времени. Цель статьи – получение алгоритма оценивания с уменьшенным числом вычислительных операций в рамках адаптивного байесовского подхода.

Алгоритм пеленгования. Для логарифма функции правдоподобия с учетом отбрасывания независимых от  $\boldsymbol{\eta}$  слагаемых запишем:

$$\begin{aligned} \ln \ell(A, \varphi, \boldsymbol{\eta}_a) &= -\mathbf{y}^+ \mathbf{y} + A e^{j\varphi} \mathbf{y}^+ \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a) + A e^{-j\varphi} \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{y} - A^2 \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a) \quad \square \\ \square 2A \operatorname{Re}(e^{j\varphi} \mathbf{y}^+ \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)) - A^2 \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a) &= 2A \operatorname{Re}(e^{j\varphi} |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| e^{j\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)} - A^2 |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2) = \quad (1) \\ &= 2A \cos(\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) + \varphi) |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - A^2 |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 \end{aligned}$$

где  $|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| = |\mathbf{y}^+ \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|$ ;  $\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) = \arg(\mathbf{y}^+ \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a))$  - модуль и фаза результата  $\mathbf{y}^+ \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)$  обработки (фокусировки) принимаемой реализации;  $|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)$ ;  $\boldsymbol{\eta}_a = (\alpha, \beta, \gamma, \chi)^T$  - «антенная» составляющая вектора оцениваемых параметров. Величина  $|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2$  представляет собой квадрат нормы вектора ДН приемных каналов для заданного  $\boldsymbol{\eta}_a$ .

Будем использовать последовательное оценивание и адаптивный байесовский подход. Для заданного вектора  $\boldsymbol{\eta}_a$  вычислим составим систему уравнений правдоподобия для оценки неизвестных условных (при заданном  $\boldsymbol{\eta}_a$ ) амплитуды и фазы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \ell(A, \varphi, \boldsymbol{\eta}_a)}{\partial \varphi} &= -2A \sin(\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) + \varphi) |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| = 0 \Rightarrow \hat{\varphi} = -\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) \\ \frac{\partial \ln \ell(A, \varphi, \boldsymbol{\eta}_a)}{\partial A} &= 2 \cos(\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) + \varphi) |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - 2A |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = 0 \Rightarrow \hat{A} = \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив оценки амплитуды и фазы в логарифм функции правдоподобия, получим:

$$\begin{aligned} \ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a) &= 2A \cos(\underbrace{\varphi(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a) + \varphi}_{=0}) |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - A^2 |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = \\ &= 2 \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} |F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)| - \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^4} |F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2 = 2 \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|} - \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} = 2x - x^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x = \frac{|F(\mathbf{y}, \boldsymbol{\eta}_a)|}{|F(\boldsymbol{\eta}_a)|}$ .

При  $\mathbf{y} = A_c e^{j\varphi_c} \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac})$ ,  $\boldsymbol{\eta}_a = \boldsymbol{\eta}_{ac}$  получим:

$$\ln \ell(\boldsymbol{\eta}_{ac}) = 2 \frac{|A_c e^{-j\varphi_c} \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac})|}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac})|} - \frac{|A_c e^{-j\varphi_c} \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac})|^2}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_{ac})|^2} = 2A_c - A_c^2$$

При  $\mathbf{y} = A_c e^{j\varphi_c} \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)$ ,  $\boldsymbol{\eta}_a \neq \boldsymbol{\eta}_{ac}$  получим:

$$\begin{aligned} \ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a \neq \boldsymbol{\eta}_{ac}) &= 2 \frac{|A_c e^{-j\varphi_c} \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|} - \frac{|A_c e^{-j\varphi_c} \mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} = \\ &= 2A_c \frac{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|} - A_c^2 \frac{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_{ac}) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|^2}{|\mathbf{f}^+(\boldsymbol{\eta}_a) \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}_a)|^2} \end{aligned}$$

При этом в отсутствии шумов  $\ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a \neq \boldsymbol{\eta}_{ac}) < \ln \ell(\boldsymbol{\eta}_a = \boldsymbol{\eta}_{ac})$

Таким образом, за счет вычисления (2) условных оценок амплитуды и фазы принимаемого сигнала на выходе изотропной приемной антенны с согласованной поляризацией удалось исключить эти параметры из процедуры максимизации ФП. Для получения оценок угловых координат и поляризационных параметров необходимо максимизировать условную ФП (3).

Для нахождения и упрощения поиска экстремума ФП при переборе по четырем параметрам находим номер  $i_{оп}$  опорного канала (пары диполей - турникета), для которого амплитуда сигналов в канале на обоих поляризациях максимальна. Грубо измеряем угловые координаты и поляризацию ИРИ с использованием направленных свойств этих антенн. Находим начальное приближение для получения точных оценок угловых координат и поляризационных параметров. На рисунке 1 приведена блок-схема алгоритма.

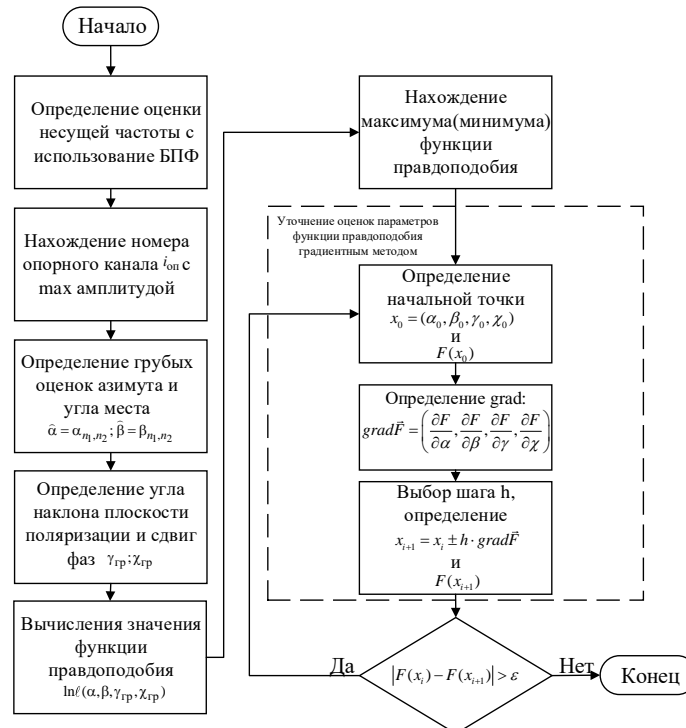


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма оценивания информационных параметров

Сам алгоритм включает следующие этапы:

- 1) нахождение оценки несущей частоты с использованием БПФ по короткой реализации сигналов на выходе этого приемного канала, с целью извлечения для каждой частоты (длины волны) значений ДН  $f(\eta_a)$ .
- 2) нахождение номера  $i_{\text{оп}}$  опорного канала (турникета), для которого амплитуда сигнала в канале на обоих поляризациях максимальна:

$$i_{\text{оп}} = \arg \max_i \sqrt{|\dot{Y}_{2i}|^2 + |\dot{Y}_{2i+1}|^2} \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  соответствующие индексы номера по азимуту и номера яруса.

- 3) определение грубых оценок азимута и угла места источника излучения  $\hat{\alpha} = \alpha_{\text{ГР}} = \alpha_{n_1, n_2}; \hat{\beta} = \beta_{\text{ГР}} = \beta_{n_1, n_2}$ .

4) грубое определение угла наклона плоскости поляризации и сдвиг фаз ортогонально ориентированных компонентов по сигналу в этом приемном канале:

$$\gamma_{\text{ГР}} = \arctan \frac{|\dot{Y}_{2i_{\text{оп}}+1}|}{|\dot{Y}_{2i_{\text{оп}}}|}, \quad (5)$$

$$\chi_{\text{ГР}} = \arg(\dot{Y}_{2i_{\text{оп}}+1}) - \arg(\dot{Y}_{2i_{\text{оп}}}); \quad (6)$$

5) уточнение оценок  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\chi}$  и определение экстремума функции правдоподобия с помощью метода градиентного спуска с шагом  $\delta\alpha$  и  $\delta\beta$  в диапазоне  $\alpha_{\text{ГР}} \pm \Delta\alpha$  и  $\beta_{\text{ГР}} \pm \Delta\beta$  для угловых координат и с шагом  $\delta\gamma, \delta\chi$  в диапазоне  $\gamma_{\text{ГР}} \pm \Delta\gamma$  и  $\chi_{\text{ГР}} \pm \Delta\chi$ .

6) нахождение максимума функции правдоподобия из рассчитанных значений и его аргументы.

При необходимости точной оценки всех параметров п. 3 и п.4 повторяются до тех пор, пока результаты оценки не перестают изменяться.

После нахождения грубых оценок информационных параметров с помощью вычисляются значения функции правдоподобия  $\ln \ell(\alpha_{\text{ГР}}, \beta_{\text{ГР}}, \gamma_{\text{ГР}}, \chi_{\text{ГР}})$  по всем четырем параметрам сигнала идет уточнение оценок. Для этого необходимо найти вблизи грубой оценки еще несколько значений для получения точных оценок угловых координат и поляризационных параметров.

Для сокращения числа переборов по каждому из параметров для упрощения поиска экстремума и для получения точных оценок применим метод градиентного спуска в окрестности найденного максимума(минимума).

В качестве начальной точки для градиентного метода используются найденные грубые оценки по всем антенным параметрам  $x_0 = (\alpha_{\text{ГР}}, \beta_{\text{ГР}}, \gamma_{\text{ГР}}, \chi_{\text{ГР}})$ . После нахождения значения функции в этой точке определяем  $\text{grad}\mathbf{F}(x_0)$ . Под градиентом здесь понимается определение направления наибольшей крутизны спуска (подъема). Для нашего случая градиент от  $\mathbf{F}(x_0)$  имеет вид:

$$\text{grad}\mathbf{F}(x_0) = \left( \frac{\partial F}{\partial \alpha}, \frac{\partial F}{\partial \beta}, \frac{\partial F}{\partial \gamma}, \frac{\partial F}{\partial \chi} \right), \quad (7)$$

$$\text{где } \frac{\partial F}{\partial \alpha} = \frac{F(\alpha_0 + \Delta\alpha, \beta_0, \gamma_0, \chi_0) - F(\bar{x}_0)}{\Delta\alpha}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \chi} = \frac{F(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \chi_0 + \Delta\chi) - F(\bar{x}_0)}{\Delta\chi}.$$

По данной формуле определяем направление наибольшей крутизны спуска (подъема) и перемещаемся в выбранном направлении на некоторый шаг.

После определения следующей точки по формуле  $x_{i+1} = x_i \pm h \cdot \text{grad}\mathbf{F}(x_i)$  и прохождения цикла с заданным числом итераций находим уточненные оценки интересующих нас параметров.

Алгоритм градиентного спуска по четырем параметрам:

- 1) Определение  $x_0 = (\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \chi_0)$  принадлежащей допустимой области и  $F(x_0)$ ;
- 2) Определение  $\text{grad}\mathbf{F}(x_0)$  или  $-\text{grad}\mathbf{F}(x_0)$ ;
- 3) Выбор шага  $h$ ;
- 4) Определение следующей точки по формуле  $x_{i+1} = x_i \pm h \cdot \text{grad}\mathbf{F}(x_i)$  «+» – если  $\max$ , «-» – если  $\min$ ;

5) Определение  $F(x_{i+1})$  и:

– если  $|F(x_i) - F(x_{i+1})| < \varepsilon$ , решение найдено;

– если нет, то переход к п. 2.

В результате выполнения алгоритма оценивания информационных параметров с применением градиентного метода находятся точные оценки поляризационных параметров и угловых координат с уменьшенным числом вычислительных операций в рамках адаптивного байесовского подхода.

Результаты апробации методики. Апробация методики проводилась с использованием математической модели выходных сигналов корреляционно-интерферометрического пеленгатора, приведенной в [1]. При вычислении использовались рассчитываемые в модели векторы  $f(\eta_a)$  значений диаграмм направленности приемных элементов при заданных параметрах сигнала  $\eta_a$ .

Принимались следующие исходные данные: ортогональные пары вибраторов с длиной плеча 0,2 м были размещены в 6 рядов по азимуту (с равным шагом) и 3 ряда по углу места по касательной к поверхности полусферы радиусом 1 м; первый ярус приемных элементов размещался под углом места  $10^\circ$ , последующие – с шагом  $20^\circ$ ; длина волны источника излучения составляла 1 м;

На рисунке 2 приведен вид логарифма функции правдоподобия, полученный при  $A/\sigma_{ш}=100$ ,  $\alpha_c=145^\circ, \beta_c=40^\circ$ , при изменении каждого их четырех «антенных» параметров. Рисунок 2 а) соответствует линейной наклонной поляризации ( $\gamma_c = \pi/4, \chi_c = 0$ ), рисунок 2 б) – эллиптической поляризации ( $\gamma_c = \pi/4, \chi_c = \pi/3$ ).

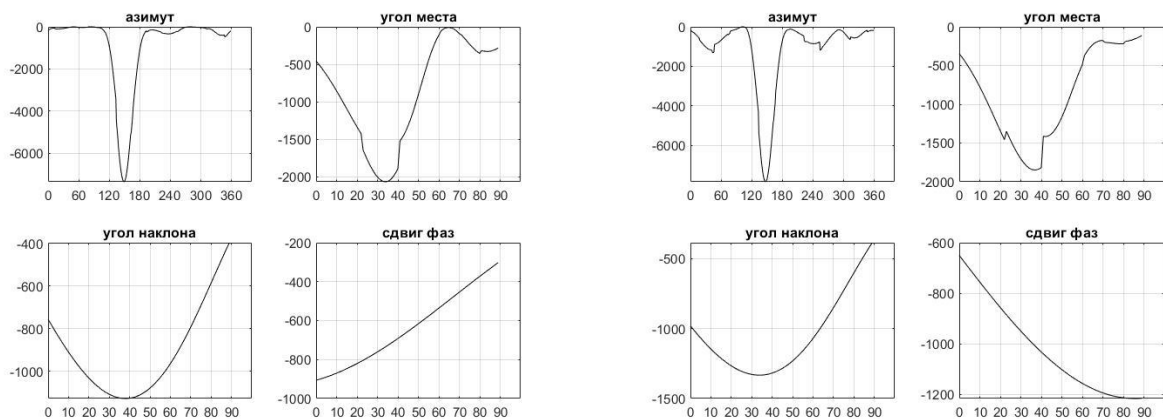


Рисунок 2 – Вид логарифма функции правдоподобия при линейной наклонной поляризации (а) и при эллиптической поляризации (б) принимаемого сигнала

По полученным графикам видим, что минимумы решающей статистики соответствуют приближенным истинным значениям угловых координат и поляризационных параметров. На полученных зависимостях решающей статистики от азимута (в большей степени) и угла места (в меньшей степени) наблюдаются также локальные экстремумы, как и при построении функции правдоподобия оптимального алгоритма по шести информационным параметрам. Зависимость решающей статистики от азимута многоэкстремальная, но с выраженным глобальным минимумом. Зависимости от поляризационных параметров имеют один экстремум. Все эти особенности позволяют использовать градиентный метод для нахождения совместной оценки всех информационных параметров при условии, что начальное приближение для градиентного метода («грубая» оценка) по азимуту достаточно точное и находится в пределах локальных максимумов, между которыми расположен глобальный минимум.

Заключение. Разработанная методика совместно с моделью принимаемого сигнала [1] может быть использована при оптимизации технических решений по построению поляризационно-чувствительных пеленгаторов и исследованию их эффективности. Данный алгоритм полностью проверяется имитационно и проводится сравнение со статистически оптимальным (матрица Фишера)[2].

**Список использованных источников:**

1. Башкова М. А., Козлов С. В. Математическая модель входной реализации для корреляционно-интерферометрического пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами, размещенными на криволинейной поверхности / Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2022 : материалы научно-технической конференции, Минск, 29–30 ноября 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – с. 94–100

2. Башкова М. А., Козлов С. В. Методика оценки потенциальной точности корреляционно-интерферометрического пеленгатора с ортогонально поляризованными приемными каналами / Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2022 : материалы научно-технической конференции, Минск, 29–30 ноября 2022 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – с. 101–105.
3. Хэмминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. – М.: Сов. радио, 1972. – 399 с.
4. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. Под редакцией А.М. Рембовского. – М.: ГОРЯЧАЯ ЛИНИЯ - ТЕЛЕКОМ, 2010. – 624 с.
5. Гулько В. Л., Мещеряков А. А. Поляризационно-модуляционный метод измерения пеленга и угла крена подвижного объекта с использованием радиомаяка // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19, № 1. С. 5-8.
6. Павлов В. С., Турнецкая Е. Л. Потенциальная точность пеленгации на основе кольцевой антенной решетки из линейно поляризованных элементов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 86–90.
7. Павлов В. С. Синтез пространственно-кольцевого пеленгатора источника поляризованного излучения / В. С. Павлов, Е. Л. Турнецкая // Информационно-управляющие системы, № 6, 2014. – С. 6-12.
8. Поздняк С. И., Мелитицкий В. А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. — М.: Сов. радио, 1974. — 480 с.

UDC 621.396

## JOINT ESTIMATION OF THE ANGULAR COORDINATES AND POLARIZATION PARAMETERS OF A RADIATION SOURCE IN A CORRELATION-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDER WITH ORTHOGONALLY POLARIZED RECEIVING CHANNELS

*Bashkova M. A.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Kozlov S. V. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor*

**Annotation.** The main provisions of the methodology for constructing an algorithm for the joint estimation of angular coordinates and polarization parameters of a radiation source for a direction finder with orthogonally polarized receiving channels placed on a curved surface are described. The results illustrating the efficiency of the technique are presented.

**Keywords.** Direction finder, polarization, polarization parameters of radio signals, gradient, estimation algorithm, likelihood function, adaptive Bayesian approach, radio direction finding, polarization-sensitive direction finder, angular coordinates of a radio emission source.