

УДК 621.396.96

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В БАЗОВО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

А.А. ДМИТРЕНКО, С.Ю. СЕДЫШЕВ

*Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 декабря 2016*

**Аннотация.** Произведен пересчет ошибок измерения разностей времени запаздывания в ошибки измерения азимута и дальности. Представлена методика расчета параметров стробов отождествления по азимуту и дальности в устройстве пространственно-временного межпозиционного отождествления сигналов.

**Ключевые слова:** ошибка измерения, пространственно-временное отождествление.

**Abstract.** Recalculation of measurement time delay differences errors in measurement azimuth and range errors is made. The technique of parameters definition of identification azimuth and range strobes in existential interitem signals identification device is presented.

**Keywords:** measurement error, existential identification.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 17-24**

**Parametrical synthesis of the existential signals identification device in cross-correlation passive radars**

**A.A. Dmitrenko, S.Yu. Sedushev**

### Введение

Сущность работы синтезированного в [1] устройства пространственно-временного межпозиционного отождествления сигналов источников радиоизлучения (ИРИ) в базово-корреляционных комплексах пассивной локации (КПЛ) заключается в следующем. Пространство радиолокационного наблюдения разбивается на стробы отождествления, после чего каждому из них ставится в соответствие совокупность диапазонов значений разностей времени запаздывания для каждой из пар приемных пунктов комплекса. Поиск, обнаружение и измерение относительных временных задержек осуществляются только в заданных диапазонах значений, что позволяет однозначно установить соответствие между отождествляемыми сигналами.

Установить соответствие между стробами отождествления в сферической системе координат и совокупностями диапазонов разностей времени запаздывания позволяет описанная в работах [1–5] взаимосвязь пространственного положения ИРИ и разностей хода их сигналов. На сегодняшний день отсутствует алгоритм разбиения пространства радиолокационного наблюдения в сферической системе координат на стробы отождествления. Таким образом, задача разработки методики расчета параметров устройства пространственно-временного отождествления сигналов заключается в определении оптимальных размеров стробов отождествления по азимуту, углу места и дальности при независимых и известных значениях ошибок измерения разностей времени запаздывания сигналов ИРИ относительно разнесенных в пространстве приемных пунктов КПЛ.

## Пересчет ошибок измерения разностей хода в ошибки измерения азимута и дальности

Вычислим ошибки определения местоположения ИРИ на плоскости в круговой системе координат (дальность, азимут), при известных и независимых ошибках измерения разностей хода сигналов относительно приемных пунктов КПЛ. В этом случае вектор измеряемых параметров характеризует область в пространстве круговой системы координат ( $\alpha = |r \ \beta|^T$ ). Вектор наблюдаемых параметров представляет собой совокупность разностей дальности ( $\theta = |\delta r_i|^T, i = 1..N_{baz}$ ). Геометрия задачи для двухбазового КПЛ представлена на рис. 1.

При заданных условиях векторная функция пересчета [6, 7]:

$$\mathbf{h} = \|r - r_i\| = \left\| r - \sqrt{r^2 - 2rd_i \cos(\beta - \beta_i) + d_i^2} \right\|.$$

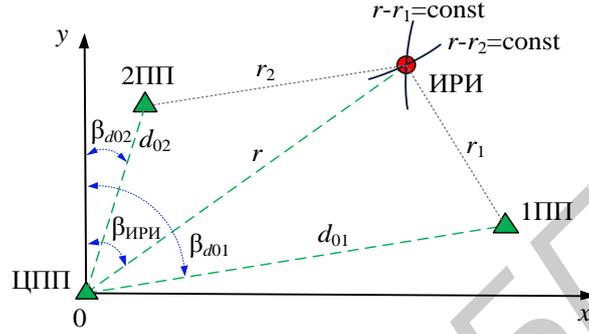


Рис. 1. Пространственное расположение элементов двухбазового КПЛ

Статическая матрица пересчета [6, 7]:

$$\mathbf{H} = \begin{vmatrix} \frac{dh_i}{dr} & \frac{dh_i}{d\beta} \end{vmatrix}^T = \begin{vmatrix} 1 - \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} & -\frac{rd_i \sin(\beta - \beta_i)}{r_i} \end{vmatrix}^T.$$

Матрица точности измеряемых параметров (азимут, дальность) [6, 7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_\alpha &= \mathbf{H}^T \mathbf{C}_\theta \mathbf{H} = \mathbf{R}_\alpha^{-1} = \\ &= \begin{vmatrix} 1 - \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} & -\frac{rd_i \sin(\beta - \beta_i)}{r_i} \end{vmatrix}^T \begin{vmatrix} \frac{1}{\sigma_{\delta r 01}^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{\delta r 02}^2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 - \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} & -\frac{rd_i \sin(\beta - \beta_i)}{r_i} \end{vmatrix} = \\ &= \left\| \begin{matrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)^2}{\sigma_{\delta r_i}^2} & \sum_{i=1}^n \frac{d_i r \sin(\beta - \beta_i) \left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i} \\ \sum_{i=1}^n \frac{d_i r \sin(\beta - \beta_i) \left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i} & \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2 r^2 \sin^2(\beta - \beta_i)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i^2} \end{matrix} \right\| \end{aligned} \quad (1)$$

где  $r_i = \sqrt{d_i^2 - 2 \cos(\beta - \beta_i) d_i r + r^2}$  – дальность от  $i$ -го ПП до ИРИ.

Из общих соображений для нее же имеем [6, 7]:

$$\mathbf{C}_\alpha = \frac{1}{(1 - \rho_{r\beta}^2)} \begin{vmatrix} \frac{1}{\sigma_r^2} & -\frac{\rho_{r\beta}}{\sigma_r \sigma_\beta} \\ -\frac{\rho_{r\beta}}{\sigma_r \sigma_\beta} & \frac{1}{\sigma_\beta^2} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Для поиска решения сопоставляем выражения (1) и (2), составляем и решаем систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\sigma_r^2} &= (1 - \rho_{r\beta}^2) C_{11} \Rightarrow \sigma_r = \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho_{r\beta}^2) C_{11}}}; \\ \frac{1}{\sigma_\beta^2} &= (1 - \rho_{r\beta}^2) C_{22} \Rightarrow \sigma_\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho_{r\beta}^2) C_{22}}}; \\ -\frac{\rho_{r\beta}}{\sigma_r \sigma_\beta} &= (1 - \rho_{r\beta}^2) C_{12} = (1 - \rho_{r\beta}^2) C_{21} \Rightarrow \rho_{r\beta} = -(1 - \rho_{r\beta}^2) \sigma_r \sigma_\beta C_{21} = -(1 - \rho_{r\beta}^2) \sigma_r \sigma_\beta C_{12} = \\ &= -(1 - \rho_{r\beta}^2) \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho_{r\beta}^2) C_{11}}} \frac{1}{\sqrt{(1 - \rho_{r\beta}^2) C_{22}}} C_{12} = -\frac{(1 - \rho_{r\beta}^2) C_{12}}{\sqrt{(1 - \rho_{r\beta}^2)^2 C_{11} C_{22}}} = -\frac{C_{12}}{\sqrt{C_{11} C_{22}}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Путем решения системы уравнений (3) были получены следующие результаты.  
Ошибки измерения азимута:

$$\sigma_\beta = \left( (1 - \rho_{r\beta}^2) \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2 r_i^2 \sin^2(\beta - \beta_i)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i^2} \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

ошибки измерения дальности:

$$\sigma_r = \left( (1 - \rho_{r\beta}^2) \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)^2}{\sigma_{\delta r_i}^2} \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

коэффициент корреляции:

$$\rho_{r\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_i r_i \sin(\beta - \beta_i) \left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{r - d_i \cos(\beta - \beta_i)}{r_i} - 1 \right)^2}{\sigma_{\delta r_i}^2} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2 r_i^2 \sin^2(\beta - \beta_i)}{\sigma_{\delta r_i}^2 r_i^2}}}. \quad (6)$$

Элементы матрицы ошибок при определении положения ИРИ в сферической системе координат (азимут, угол места, дальность) вычисляются аналогичным образом, однако их вычисление сопряжено со значительной громоздкостью получаемых выражений. С целью уменьшения вычислительных затрат и упрощения математических выкладок в этом случае зона обзора в угломестной плоскости разбивается на сектора с последующим использованием выражений (4)–(6) для каждого из полученных угломестных секторов [1].

Полученные выражения (4)–(6) позволяют определять параметры стробов отождествления в виде эллипсов на плоскости (эллипсоидов в пространстве), что неудобно в практическом применении. Более целесообразной представляется их аппроксимация трапецией при определении плоскостных координат (рис. 2, а), или параллелепипедом при определении пространственных координат (рис. 2, б). Размеры строба выбираются такими, чтобы в него помещался вычисленный эллипс (эллипсоид) ошибок.

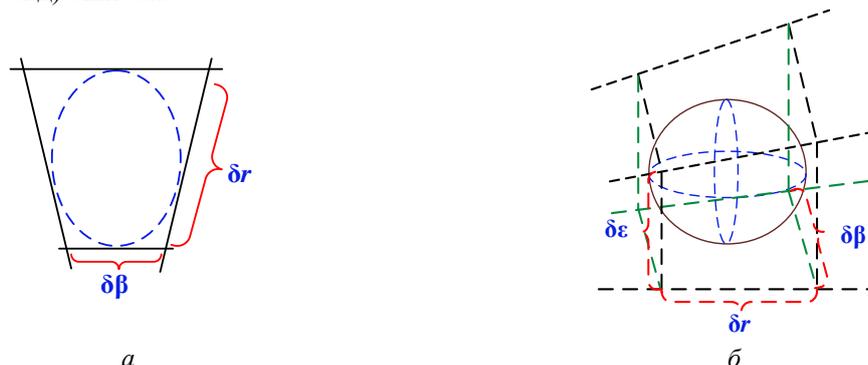


Рис. 2. Стробы отождествления в круговой (а) и сферической системах координат (б)

## Методика определения параметров стробов отождествления по азимуту и дальности

Определим параметры стробов отождествления в круговой системе координат (дальность, азимут) при известных и независимых ошибках измерения разностей хода, которые, в свою очередь, определяются величиной разрешающей способности по разности хода.

Методика разбиения пространства обзора на стробы отождествления по азимуту и дальности и формирования соответствующих им диапазонов значений относительных временных задержек описывается следующей последовательностью действий.

1. Измеряется (или задается наиболее вероятное значение) ширина спектра сигнала  $\Delta f_s$  ИРИ. Допустим, мы ожидаем к обработке сигнал с шириной спектра 100 кГц.

2. Вычисляется разрешающая способность по разности хода [6]:  $\Delta(\delta r) = \frac{c}{\Delta f_s}$ .

При ширине спектра 100 кГц разрешающая способность по разности хода составит 10 мкс.

3. Измеряются координаты приемных пунктов. Рассчитываются расстояния между соответствующими парами ПП. Примем, например, что расположение ПП КПЛ соответствует рис. 3.

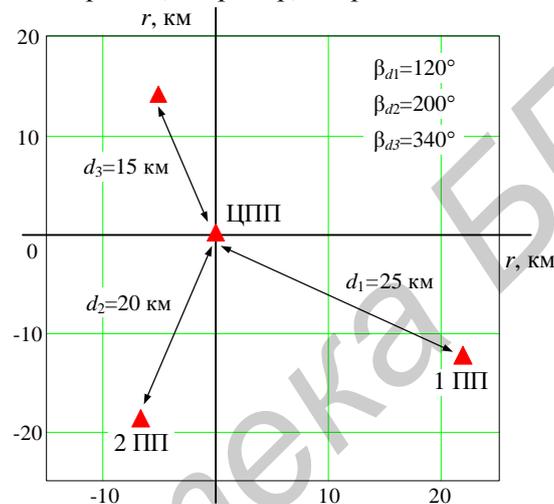


Рис. 3. Пространственное расположение приемных пунктов КПЛ

4. Рассчитываются зависимости относительных временных задержек от азимута и дальности для трех пар ПП КПЛ при фиксированных значениях угла места [1, 2] (рис. 4):

$$\delta\tau(r_i, \beta_i, \varepsilon_i) = \frac{1}{c} [r_i - \sqrt{r_i^2 - 2r_i \cdot d (\sin(\varepsilon_i) \sin(\varepsilon_d) + \cos(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_d) \cos(\beta_i - \beta_d))} + d^2],$$

где  $\delta\tau(r_i, \beta_i, \varepsilon_i)$  – разность времени запаздывания сигналов,  $\beta_i$  – азимут ИРИ,  $\beta_d$  – азимут ПП,  $\varepsilon_i$  – угол места ИРИ;  $\varepsilon_d$  – угол места ПП;  $d$  – расстояние до ПП,  $r_i$  – дальность до ИРИ,  $c$  – скорость света.

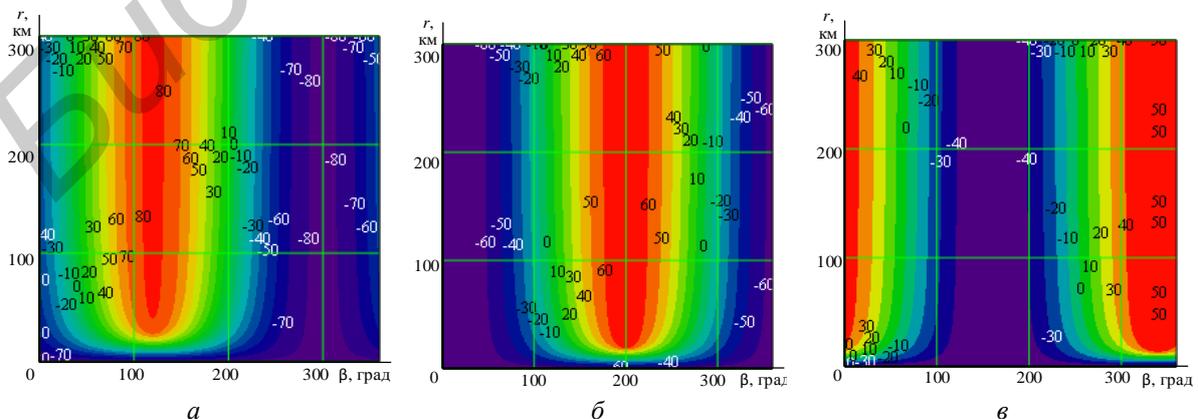


Рис. 4. Зависимость значений относительных временных задержек от азимута и дальности для 0-1 ПП (а); 0-2 ПП (б), 0-3 ПП (в)

*Определение размера стробов отождествления по азимуту.*

5. Для каждой из пар приемных пунктов рассчитываются максимально и минимально возможные значения разности дальностей ( $\max(\delta r)$  и  $\min(\delta r)$ ) [8, 9]. В зависимости от расположения ИРИ относительно приемных пунктов КПЛ значение разности хода  $\delta r_{1,2} = r_1 - r_2$  может изменяться от минимального значения  $\min \delta r_{1,2} = -d$  (ИРИ находится левее крайнего ПП на линии базы) до максимального значения  $\max \delta r_{1,2} = d$  (ИРИ находится правее крайнего ПП на линии базы). Следовательно, диапазон обзора по разности хода:

$$(\delta r_{1,2})_{\text{обз}} = \max \delta r_{1,2} - \min \delta r_{1,2} = 2d.$$

Для первой пары ПП  $\max(\delta r)/\min(\delta r)$  составляет  $\pm 25$  км, для второй пары  $\pm 20$  км, для третьей пары  $\pm 15$  км.

6. Для каждой из пар приемных пунктов рассчитываются максимально и минимально возможные значения разности времени запаздывания:  $\min(\delta \tau) / \max(\delta \tau) = \frac{\min(\delta r) / \max(\delta r)}{c}$ .

Для первой пары ПП  $\max(\delta \tau)/\min(\delta \tau)$  составляют  $\pm 83$  мкс, для второй пары  $\pm 67$  мкс, для третьей пары  $\pm 50$  мкс.

7. Диапазоны возможных значений разности времени запаздывания для каждой из пар ПП разбиваются на поддиапазоны, размер которых определяется величиной разрешающей способности (рис. 5). Число поддиапазонов определяется по формуле  $N_{\delta r} = \frac{(\delta r_{1,2})_{\text{обз}}}{\delta r} = \frac{2d\Delta f_s}{c}$  и составляет для первой пары ПП 17 поддиапазонов, для второй пары ПП 14, для третьей пары ПП 10.

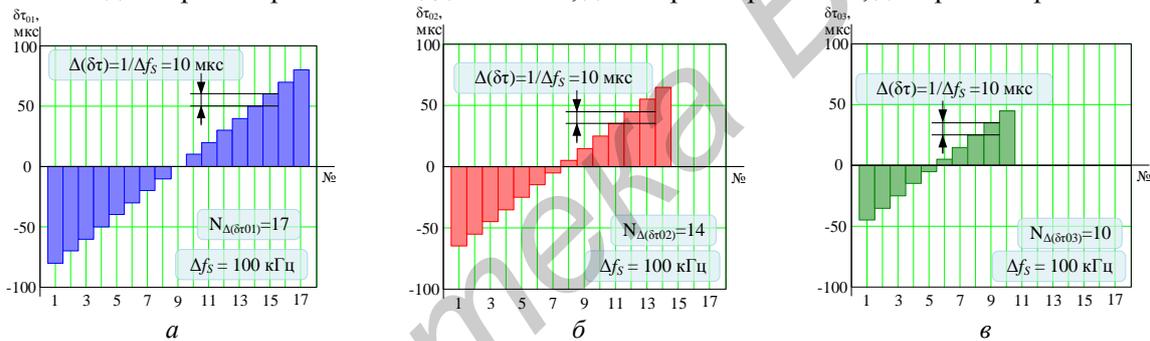


Рис. 5. Дискретизация интервалов возможных значений разности времени запаздывания по поддиапазонам для 0-1 ПП (а); 0-2 ПП (б), 0-3 ПП (в)

8. Каждому поддиапазону значений разности времени запаздывания согласно его номеру ставится в соответствие строб отождествления по азимуту, размер которого рассчитывается в соответствии с выражением [4]:  $\beta_i(r_i, \Delta \tau) = \beta_d + \arccos \left( \frac{(c\Delta \tau - r_i)^2 - r_i^2 - d^2}{2r_i d} \right)$ .

Ряды соответствия поддиапазонов относительных временных задержек азимутальным стробам отождествления представлены на рис. 6.

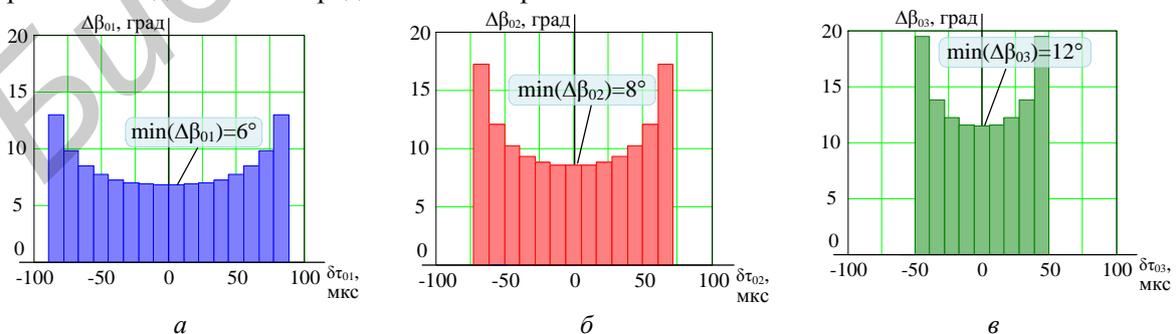


Рис. 6. Зависимость размера стробов отождествления по азимуту от поддиапазона разности времени запаздывания для 0-1 ПП (а); 0-2 ПП (б), 0-3 ПП (в)

9. В каждом из рядов соответствия определяется минимальное значение размера азимутального строба. Для первой пары ПП минимальный размер азимутального строба составляет  $6^\circ$ ,

для второй пары – 8°, для третьей – 12°. Для разбиения пространства обзора по азимуту выбирается наименьшее значение из полученных для всех пар ПП. В данном случае пространство обзора по азимуту (360°) разбивается на 60 стробов отождествления размером 6° каждый.

В случае обработки широкополосных сигналов, размеры стробов отождествления определяются на основании тактической целесообразности. Например, при ширине спектра 10 МГц и расстоянии между ПП в 25 км размер строба отождествления по азимуту будет равен 0,06°.

*Определение размеров стробов отождествления по дальности.*

10. Размеры стробов отождествления по дальности определяются путем анализа полученных зависимостей относительных временных задержек от азимута и дальности для каждой из пар ПП (рис. 4). Каждому стробу отождествления по дальности ставится в соответствие максимальная величина разброса значений относительных временных задержек, равная разрешающей способности по разности времени запаздывания.

Для рассматриваемого примера, при величине разрешающей способности по разности времени запаздывания 10 мкс, размеры стробов отождествления по дальности для трех пар ПП представлены в таблице.

**Стробы отождествления по дальности для трех пар ПП**

№поддиапазона $\Delta r$	1	2	3	4	5	6	7	8
01 ПП (км)	400	78	46	32	26	24	22	21
02 ПП (км)	400	55	31	22	18	17	16	15
03 ПП (км)	400	34	19	15	14	13	12	11

В качестве базового принимается вектор с наименьшим шагом значений стробов отождествления по дальности (в данном случае – вектор значений для 01 пары ПП).

Для пояснения принципа расчета размеров стробов отождествления по дальности на рис. 7 представлены зависимости разности времени запаздывания от дальности при фиксированных значениях азимута двух объектов наблюдения, а также разбросы значений в предположении нахождения ИРИ на дальностях от 200 до 400 км.

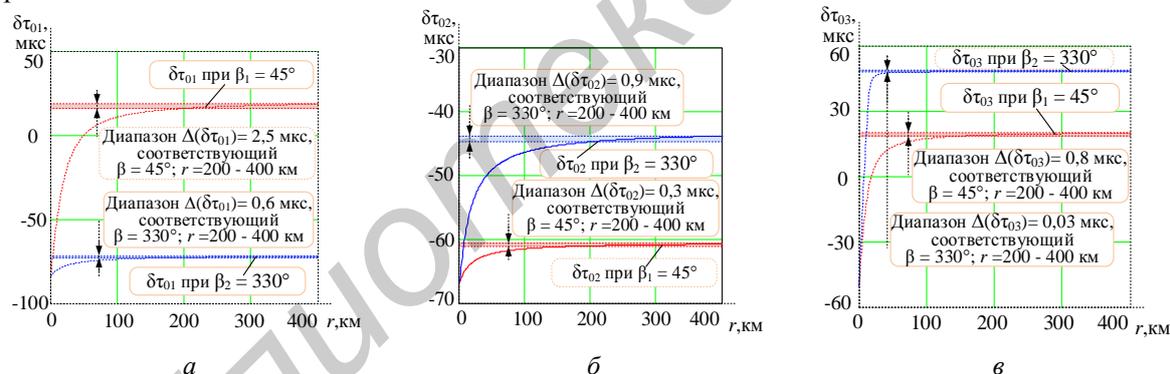


Рис. 7. Разброс значений разности времени запаздывания вследствие нелинейности зависимости от дальности в предположении нахождения ИРИ на удалении от 200 до 400 км относительно ЦПП и 1 (а), 2 (б) и 3 (в) ПП при фиксированных значениях азимута ИРИ ( $\beta_1 = 45^\circ$ ,  $\beta_2 = 330^\circ$ )

11. На завершающем этапе расчетов для всех пространственных стробов рассчитываются диапазоны значений разностей времени запаздывания [5]:

$$\Delta\tau(r_i, \beta_i) = \frac{1}{c} \cdot \left[ r_i - \sqrt{r_i^2 - 2r_i \cdot d \cos(\beta_i - \beta_d) + d^2} \right].$$

Результаты расчетов представлены на рис. 8, 9.

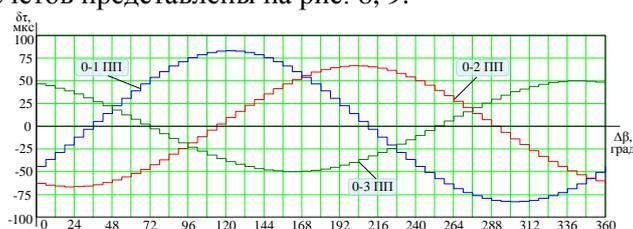


Рис. 8. Соответствие диапазонов разностей времени запаздывания азимутальным стробам для строба отождествления по дальности 78–400 км

12. Последовательно (или параллельно) осуществляется обзор в соответствующих текущим стробам отождествления по азимуту и дальности для каждой из пар приемных пунктов диапазонах относительных временных задержек.

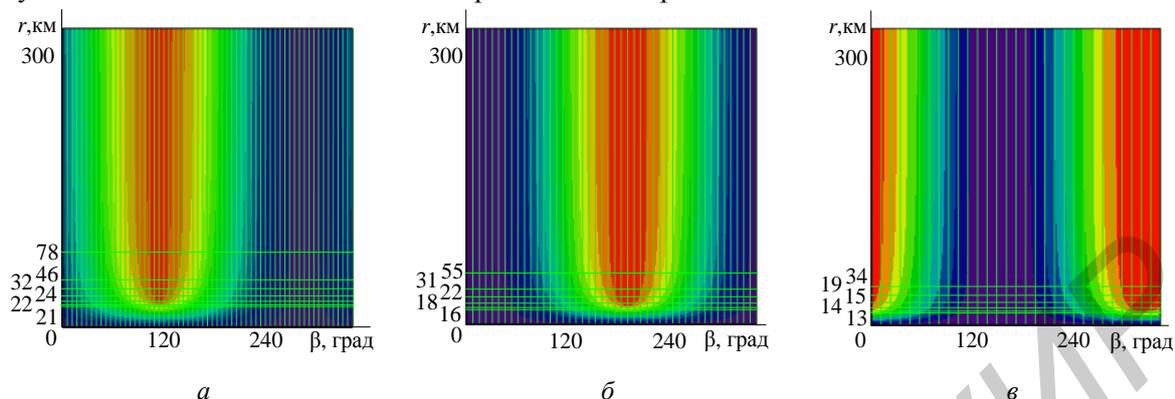


Рис. 9. Разбиение пространства обзора в круговой системе координат на стробы отождествления в пространстве относительных временных задержек для 0-1 ПП (а); 0-2 ПП (б), 0-3 ПП (в)

### Выводы

Разработанная методика разбиения пространства обзора на стробы отождествления в сферической системе координат (азимут, угол места, дальность), определения их параметров, а также формирования соответствующих им диапазонов значений относительных временных задержек, делает возможным практическое применение устройства пространственно-временного межпозиционного отождествления сигналов источников радиоизлучения в базово-корреляционных комплексах пассивной локации. Причем параметры стробов отождествления полностью определяются параметрами обрабатываемого сигнала (ширина спектра) и геометрическим фактором (взаимное расположение ИРИ и приемных пунктов КПЛ).

### Список литературы

1. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю. Межпозиционное пространственно-временное отождествление сигналов в многопозиционных базово-корреляционных комплексах пассивной локации // Докл. БГУИР. 2016. № 5 (99). С. 85–91.
2. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю. Минимизация сектора обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых системах обнаружения источников радиоизлучения с псевдообзором по азимуту // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С., фонд. науки. 2014. №4. С. 85–88.
3. Устройство быстрого обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации: патент РБ № 9543 / А.А. Дмитренко, С.Ю. Седышев, С.А. Горшков.
4. Устройство определения угловой координаты источника радиоизлучения в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации: патент РБ № 9864 / А.А. Дмитренко, С.Ю. Седышев, С.А. Горшков.
5. Способ уменьшения интервала обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых комплексах пассивной локации: патент РБ № 20162 / А.А. Дмитренко, С.Ю. Седышев, С.А. Горшков.
6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман и др. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
7. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М: Радио и связь. 1981. 416 с.
8. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. Москва: Радио и связь, 1993. 416 с.
9. Охрименко А.Е. Основы обработки и передачи информации. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. 181 с.

### References

1. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Ju. Mezhpozicionnoe prostranstvenno-vremennoe otozhdestvlenie signalov v mnogopozicionnyh bazovo-korreljacionnyh kompleksah passivnoj lokacii // Dokl. BGUIR. 2016. № 5 (99). S. 85–91. (in Russ.)
2. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Ju. Minimizacija sektora obzora po raznosti vremen zapazdyvanija v korreljacionno-bazovyh sistemah obnaruzhenija istochnikov radioizluchenija s psevdoozorom po azimutu // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. S., fund. nauki. 2014. № 4. S. 85–88. (in Russ.)

3. Ustrojstvo bystrogo obzora po raznosti vremen zapazdyvanija v korreljacionno-bazovyh kompleksah passivnoj lokacii: patent RB № 9543 / Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Ju., Gorshkov S.A. (in Russ.)
4. Ustrojstvo opredelenija uglovoj koordinaty istochnika radioizluchenija v korreljacionno-bazovyh kompleksah passivnoj lokacii: patent RB № 9864 / Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Ju., Gorshkov S.A. (in Russ.)
5. Sposob umen'shenija intervala obzora po raznosti vremen zapazdyvanija v korreljacionno-bazovyh kompleksah passivnoj lokacii: patent RB № 20162 / Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Ju., Gorshkov S.A. (in Russ.)
6. Radioelektronnye sistemy: osnovy postroenija i teorija. Spravochnik / Ja.D. Shirman i dr. M.: Radiotehnika, 2007. 512 s. (in Russ.)
7. Shirman Ja.D., Manzhos V.N. Teorija i tehnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomeh. M: Radio i svjaz'. 1981. 416 s. (in Russ.)
8. Chernjak V.S. Mnogopozicionnaja radiolokacija. Moskva: Radio i svjaz', 1993. 416 s. (in Russ.)
9. Ohrimenko A.E. Osnovy obrabotki i peredachi informacii. Minsk: MVIZRU PVO, 1990. 181 s. (in Russ.)

#### **Сведения об авторах**

Дмитренко А.А., м.н.с. кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Седышев С.Ю., к.т.н., доцент, профессор кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

#### **Адрес для корреспонденции**

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, д. 220,  
Военная академия Республики Беларусь  
тел. +375-29-779-48-89;  
e-mail: sedbox@mail.ru;  
Седышев Сергей Юрьевич

#### **Information about the authors**

Dmitrenko A.A., junior researcher of department of radiolocation and transceivers of Military academy of the Republic of Belarus.

Sedushev S.Yu., PhD, associate professor, professor of department of radiolocation and transceivers of Military academy of the Republic of Belarus.

#### **Address for correspondence**

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti ave., 220,  
Military academy of the Republic of Belarus  
tel. +375-29-779-48-89;  
e-mail: sedbox@mail.ru;  
Sedushev Sergei Yur'evich