

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.7>

УДК: 621.396.969.1

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ НА ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХКАНАЛЬНОМ ФАЗОВОМ РАДИОПЕЛЕНГАТОРЕ

Е.Н. Буйлов<sup>1</sup>, А.С. Солонар<sup>1</sup>, П.В. Бойкачев<sup>1</sup>, Б.А. Лях<sup>1</sup>, И.Б. Кожобаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Военная академия Республики Беларусь»

220057, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д. 220

<sup>2</sup> Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева  
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынулы, д. 126/1

Статья поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

**Аннотация.** В статье представлена структурная схема двухканального фазового радиопеленгатора с амплитудной модуляцией сигнала. Рассмотрены особенности формирования диаграммы направленности в виде кардиоиды с использованием ненаправленных биконических антенн. Предложен алгоритм оценки пеленга при использовании ограниченного количества антенных элементов (двух пеленгационных пар). Представлен вариант увеличения количества оценок пеленга за один контакт с источником радиоизлучения, основанный на использовании скользящего буфера.

**Ключевые слова:** источник радиоизлучения, малогабаритный двухканальный фазовый радиопеленгатор, ограниченное число антенных элементов, алгоритм оценки пеленга.

**Автор для переписки:** Буйлов Евгений Николаевич, [lerka.by@mail.ru](mailto:lerka.by@mail.ru)

## Введение

В настоящее время, беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются весьма востребованным и полезным атрибутом во всех отраслях жизнедеятельности человека. Благодаря своим малым размерам и возможностью дистанционного управления они используются для решения ряда задач, например, таких как охрана территории, доставка груза в труднодоступные районы, сельском хозяйстве и др. Наряду с этим БЛА стали широко применяться для несанкционированного проникновения на особо важные объекты (например, в аэропорты, на военные объекты, промышленную инфраструктуру), что подталкивает к совершенствованию (разработке новых) систем противодействия им [1].

Наиболее эффективным и перспективным способом противодействия БЛА является использование средств радиоэлектронного подавления [1-3]. Этапу их применения предшествует вскрытие средствами радиотехнической разведки факта полета БЛА как источника радиоизлучения (ИРИ), вскрытие сигнально-частотных параметров каналов радиоуправления и передачи данных и выдачу целеуказания (рис. 1).

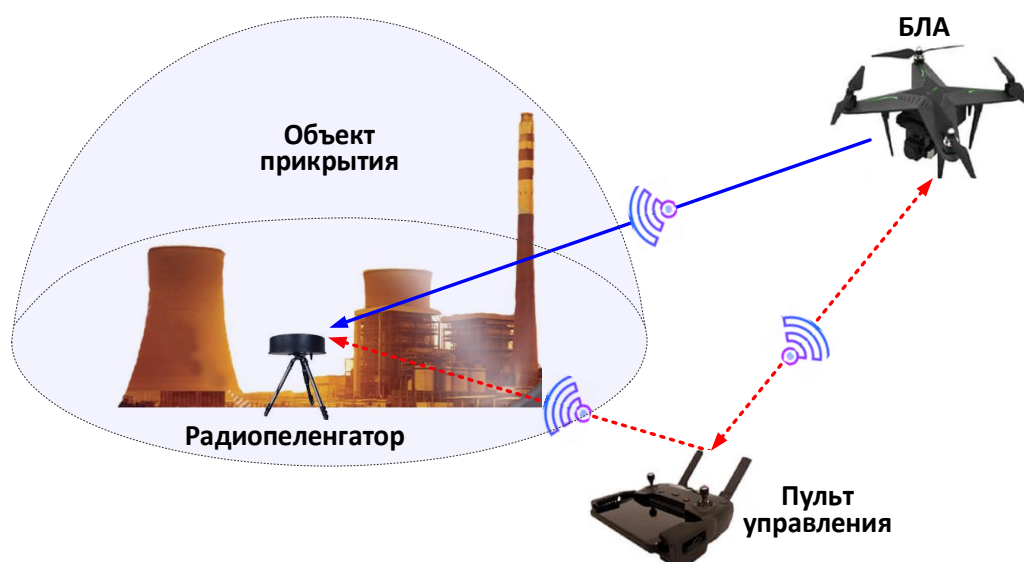


Рис. 1. Пример возможного воздействия БЛА на объект прикрытия средств радиотехнической разведки.

В связи с этим одним из актуальных направлений научных исследований заключается в выработке предложений по созданию перспективных средств радиотехнической разведки, обеспечивающих обнаружение и определение координат ИРИ с последующей выдачей полученной радиолокационной информации потребителю.

Данная статья является продолжением публикации [4], посвященной разработке двухканального фазового радиопеленгатора, обладающего малогабаритностью, простотой реализации, невысокой стоимостью, минимальным энергопотреблением и требуемой точностью определения направления на ИРИ.

Таким образом, цель настоящей работы заключается в рассмотрении алгоритма определения направления на ИРИ в малогабаритном двухканальном фазовом радиопеленгаторе с амплитудной модуляцией сигнала.

## **Основная часть**

В соответствии с работой [4] при разработке фазового радиопеленгатора за основу взят двухканальный приемопередатчик LimeSDR со встроенными аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, работающий в диапазоне частот 100 кГц – 3,8 ГГц [5]. Ограничение, обусловленное количеством каналов обработки вызвало необходимость реализовать последовательный обзор пространства за счет электронного сканирования диаграммы направленности антенны (ДНА) с угловой скоростью  $\Omega_A$ . В таком случае, направление на ИРИ  $\theta$  соответствует сдвигу фазы огибающей принятого сигнала относительно начала отсчета (направления на Север).

По результатам проведенных исследований разработана структура двухканального фазового радиопеленгатора с амплитудной модуляцией сигнала (рис. 2), соответствующая требованиям, предъявляемым к современным системам радиоэлектронной разведки [4].

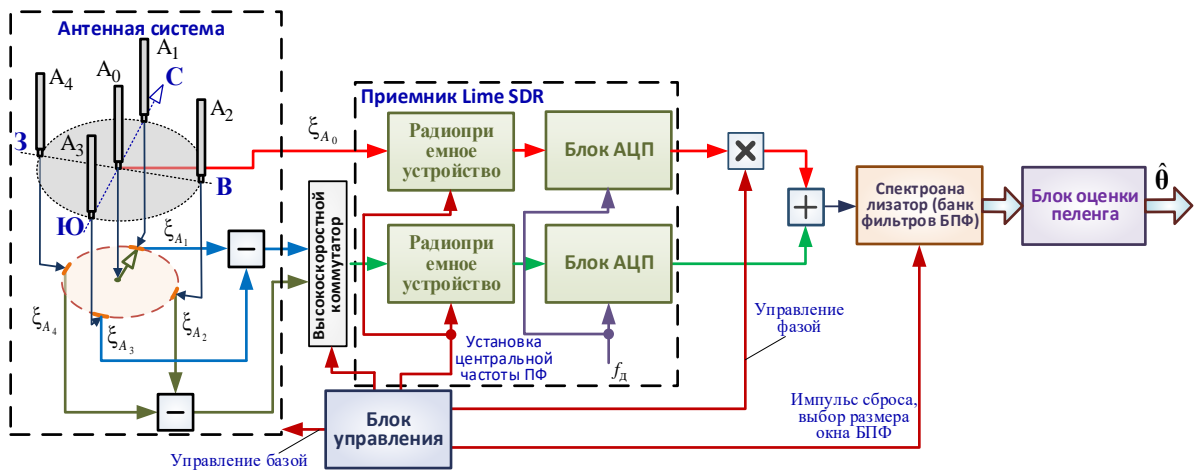


Рис. 2. Структурная схема двухканального фазового радиопеленгатора.

В данном радиопеленгаторе реализован алгоритм суммарно-разностной обработки с последовательным переключением антенных элементов (АЭ) (с помощью высокоскоростного коммутатора), расположенных по кругу.

В качестве антенной системы используется две ортогональные пеленгационные пары (ПП), ориентированные в направлениях «север-юг» и «восток-запад» соответственно. ПП представляет собой две биконические антенны разнесенные между собой на расстояние  $2d$  (рис. 3 а). Для решения задачи обнаружения и устранения неоднозначности определения направления на источник в центр антенной системы установлена дополнительная антенна  $A_0$  (биконическая). Следует отметить, что данный АЭ  $A_0$  используется и для решения задачи обнаружения ИРИ.

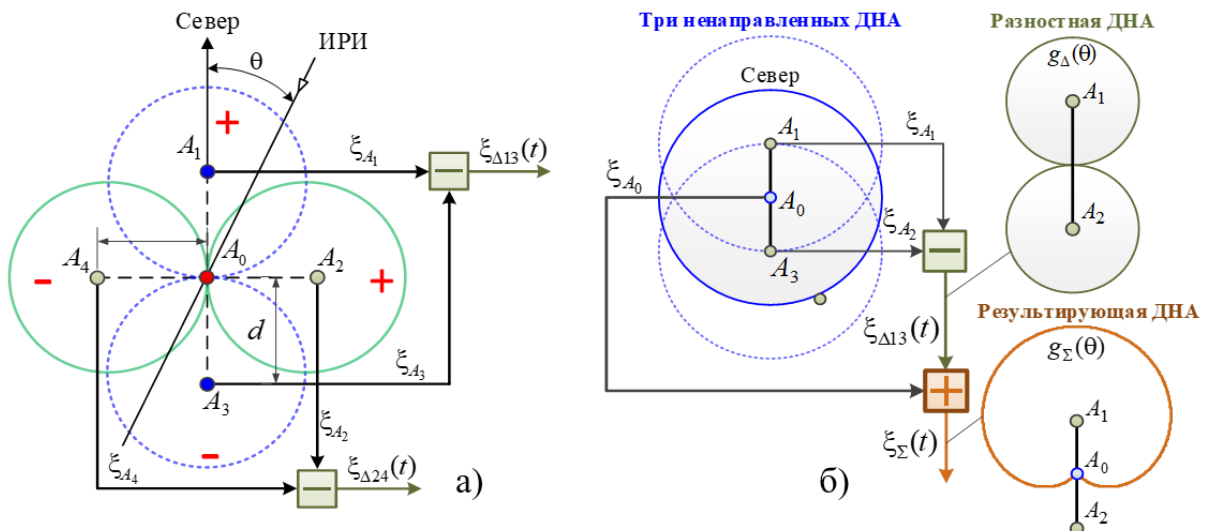


Рис. 3. Пояснение принципа формирования разностной (а) и результирующей (б) (суммарной) ДНА

Разность хода волны от антенны  $A_1$  и  $A_3$  (направление на «север» и «юг») до точки  $A_0$  составит  $\Delta r_{c(10)0} = d \cos \theta$ , что соответствует разности фаз  $\Delta \varphi_{c(10)0}$ . Разность фаз между антенной  $A_2$  и  $A_4$  (направление на «восток» и «запад») и  $A_0$  –  $\Delta \varphi_{B(3)0}$ :

$$\Delta \varphi_{c(10)0} = 2\pi d \cos \theta / \lambda \text{ и } \Delta \varphi_{B(3)0} = 2\pi d \sin \theta / \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

В таком случае электродвижущая сила (ЭДС), наводимая в антеннах ПП будет иметь вид (рис. 3 а):

$$\xi_{A_1(A_3)}(t) = E_h e^{j(\omega t \pm \Delta \varphi_{c0})} \text{ и } \xi_{A_2(A_4)}(t) = E_h e^{j(\omega t \pm \Delta \varphi_{B0})}, \quad (2)$$

где  $E_h$  – амплитуда сигнала, принятого АЭ;

$\omega$  – центральная частота радиосигнала;

$t$  – время.

Амплитуда разностных напряжений ПП «север-юг»  $\xi_{\Delta 13}(t)$  пропорциональна косинусу, а ПП «восток-запад»  $\xi_{\Delta 24}(t)$  – синусу угла прихода волны  $\theta$  (рис. 3 а):

$$\xi_{\Delta 13}(t) = U_m \cos \theta e^{j(\omega t + \pi/2)} \text{ и } \xi_{\Delta 24}(t) = U_m \sin \theta e^{j(\omega t + \pi/2)}, \quad (3)$$

где  $U_m$  – амплитуда разностного напряжения.

Следовательно, две ортогональные ПП, в сочетании с вычитающими устройствами, ориентированные в направлениях «север-юг» и «восток-запад», образуют две диаграммы направленности разнесенные относительно друг друга на  $90^\circ$  (рис. 3 а).

Для формирования ДНА в виде кардиоиды ( $g_\Sigma(\theta) = 1 + \cos(\alpha - \theta)$ , рис. 3 б), например, в направлении севера ( $\alpha = 0^\circ$ ), разностный сигнал ПП  $\xi_{\Delta 13}(t)$  суммируется с сигналом АЭ  $\xi_{A_0}$  (сумматор, рис. 2):

$$\xi_{\Sigma}(t) = \xi_{A_0}(t) + 0,5\xi_{\Delta 13(24)}(t). \quad (4)$$

При этом, формирование кардиоиды обеспечивается при выполнении условий [2-4]:

- амплитуды сигналов центрального  $A_0$  и ПП  $A_{1(3)}$  АЭ равны ( $\xi_{A_0} = \xi_{A_1} = \xi_{A_3}$ );

- начальные фазы сигналов центрального  $A_0$  и первого  $A_1$  АЭ ПП равны ( $\varphi_{A_0} = \varphi_{A_1}$ );

- начальные фазы сигналов центрального  $A_0$  и второго  $A_3$  АЭ ПП отличаться на  $\pi$  ( $\varphi_{A_0} - \varphi_{A_3} = \pi$ ).

Таким образом, направленные свойства ДНА и минимальные массогабаритные характеристики антенной системы обеспечены за счет суммарно-разностной обработки принятого сигнала с последовательным переключением АЭ. Антенная система представлена двумя ПП, ориентированными по направлениям сторон Света и одного АЭ, расположенного в центре. Исполнение АЭ в виде биконической антенны позволяет принимать сигналы в диапазоне частот 2,4-2,6 ГГц при значениях коэффициента стоячей волны 1,4-1,6 [4].

После суммарной обработки результирующий сигнал поступает на спектроанализатор (рис. 4). Оценка мгновенного спектра сигнала может быть реализована с помощью дискретного либо быстрого преобразования Фурье (БПФ) с использованием статистического усреднения (метода периодограмм) [2-4].

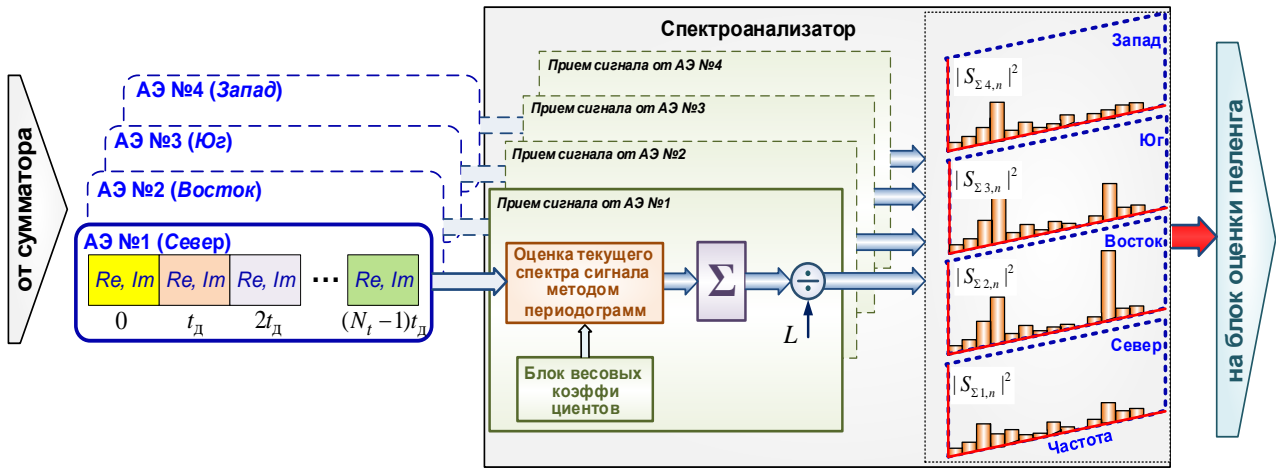


Рис. 4. Структурная схема спектроанализатора двухканального фазового радиопеленгатора

Для уменьшения уровня боковых лепестков используется весовая обработка ( $w$  – весовая функция) [6]. Алгоритм оценки мгновенного спектра сигнала для  $n$ -го АЭ имеет вид:

$$S(\theta)_{i,s} = \frac{1}{N_{\text{бпф}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{бпф}}-1} \left[ w_k \xi_{\Sigma} \exp\left(-j2\pi k i / N_{\text{бпф}}\right) \right], \quad (5)$$

где  $\text{floor}(\cdot)$  – функция округления до целого меньшего значения;

$N_{\text{бпф}}$  – размер окна БПФ;

$s$  – номер отсчета частоты (фильтра БПФ);

$i$  – номер окна БПФ.

Усреднение мгновенного спектра в  $s$ -м фильтре БПФ за время приема сигнала одним АЭ ( $T_{\text{АЭ}} = 50$  мкс) позволяет уменьшить его дисперсию (рис. 4):

$$S_{\Sigma}(\theta)_s = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} S(\theta)_{i,s}, \quad (6)$$

где  $L = \text{floor}\{T_{\text{АЭ}} / (N_{\text{БПФ}} t_d)\}$  – число выборок мгновенного спектра размером  $N_{\text{БПФ}}$  при приеме сигнала одним АЭ;

$t_d$  – шаг дискретизации по времени.

Так, например, при размере окна БПФ  $N_{\text{бпф}} = 64$ , времени приема сигнала АЭ  $T_{\text{АЭ}} = 50$  мкс и шаге дискретизации по времени  $t_d \approx 33,3$  нс возможное количество выборок мгновенного спектра составит  $L = 23$ . Следует отметить, что дополнительное уменьшение дисперсии оценки спектра обеспечивается за счет использования метода Уэлча, когда временная выборка разбивается на перекрывающиеся сегменты (чаще всего на величину  $N_{\text{бпф}} / 2$ ) [7].

Далее, полученные оценки мощности принятого сигнала за цикл обзора (прием сигнала четырьмя АЭ) поступают на блок оценки пеленга, алгоритм которого включает 4 этапа обработки (рис. 5) [4].

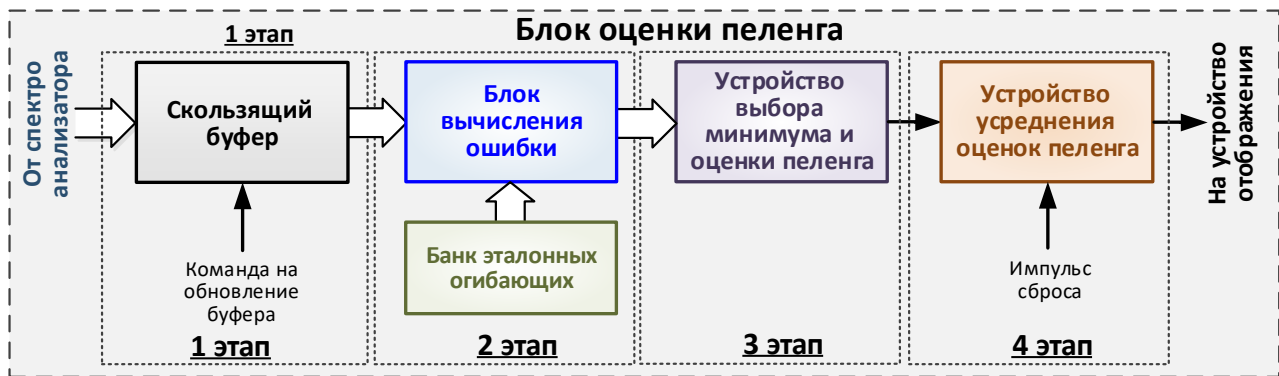


Рис. 5. Структура блока оценки пеленга

На первом этапе для увеличения количества оценок пеленга на ИРИ используется скользящий буфер (рис. 5), обеспечивающий хранение рассчитанных значений мощностей сигналов, принятых четырьмя АЭ  $\mathbf{S}_{\text{буф}}(\theta)_j = \|S_{\Sigma}(\theta)_1 S_{\Sigma}(\theta)_2 S_{\Sigma}(\theta)_3 S_{\Sigma}(\theta)_4\|$  ( $j$  – номер состояния буфера) (рис. 6) [4].



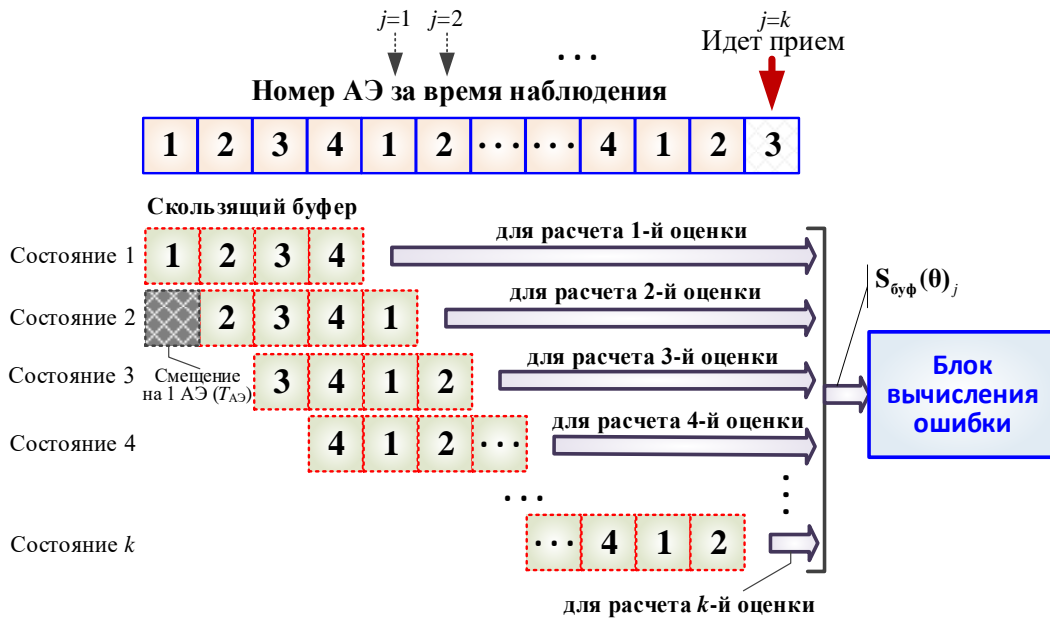


Рис. 6. Пояснение принципа использования скользящего буфера (1 этап)

Принцип работы скользящего буфера  $S_{\text{буф}}(\theta)_j$  заключается в следующем.

После каждого переключения АЭ обновляется содержимое буфера (смещение значений мощности сигнала на одну ячейку «влево» и запись нового значения в крайнюю правую). Так, например, за время совершения первого полного оборота ДНА (цикл обзора) скользящий буфер заполняется оценками мощности сигнала, принятого четырьмя АЭ (состояние 1 и  $j=1$  ( $j=\overline{1,k}$ , где  $k$  – возможное количество состояний буфера, определяемое временем наблюдения ИРИ), рис. 6). В результате формируется вектор  $S_{\text{буф}}(\theta)_1$ , используемый для вычисления первой оценки пеленга на ИРИ  $\hat{\theta}_1$ . При приеме сигнала вторым АЭ (состояние 2 и  $j=2$ , рис. 6) осуществляется очередное обновление (смещение данных буфера «влево» и запись нового значения мощности сигнала). Результатом смещения служит формирование вектора  $S_{\text{буф}}(\theta)_2$ , используемого для расчета второй оценки пеленга на ИРИ  $\hat{\theta}_2$ . Процедура продолжается до момента принятия решения об отсутствии ИРИ ( $A_0^*$ ).

Ввиду последовательного подключения к входному контуру приемника разностного напряжения ПП и высокой частоте переключения АЭ ( $\Omega_A = 5$  кГц), рассмотренный подход (использование скользящего буфера, рис. 6) позволяет

формировать не менее 5-7 оценок пеленга при приеме сигнала канала управления БЛА за время  $T_{0\text{кy}} = 500$  мкс.

На втором этапе определяется степень близости (средняя квадратическая ошибка  $\delta S(\theta)$ ) огибающей принятого сигнала (выход скользящего буфера  $S_{\text{буф}}(\theta)$ ) и эталонной ( $\eta_n$ ) (рис. 7) в соответствии с выражением [4, 8]:

$$\delta S(\theta)_{j,k} = \sum_{n=0}^{N_{\text{АЭ}}-1} \left| S_{\text{буф}}(\theta)_{j,n} - \eta_{\text{э}(n,90,k)} \right|^2, \quad (7)$$

где  $N_{\text{АЭ}} = 4$  – количество АЭ ПП;

$$\eta_{\text{э}(q,k)} = 0,25 \left[ 1 + \cos(q\Delta\theta - \varphi_{0k}) \right]^2, \quad (8)$$

где  $\Delta\theta$  – шаг изменения углового направления;

$q$  – номер шага углового направления ( $q\Delta\theta = (0...360)^\circ$ );

$\varphi_{0k} = k\Delta\varphi$  – начальная фаза эталонной огибающей;

$k$ ,  $\Delta\varphi$  – номер и шаг изменения начальной фазы соответственно ( $k\Delta\varphi = (0...360)^\circ$ ).

Например, на рис. 7 (верхняя часть) отображены эталонные огибающие со значением начальной фазы  $\varphi_0 = 0, 180, 240^\circ$  и оценки мощности сигнала в  $n$ -м АЭ. В нижней части рис. 7 представлена зависимость средней квадратической ошибки  $\delta S(\theta)$  от значения начальной фазы эталонной огибающей ( $\varphi_0$ ), изменяющейся от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

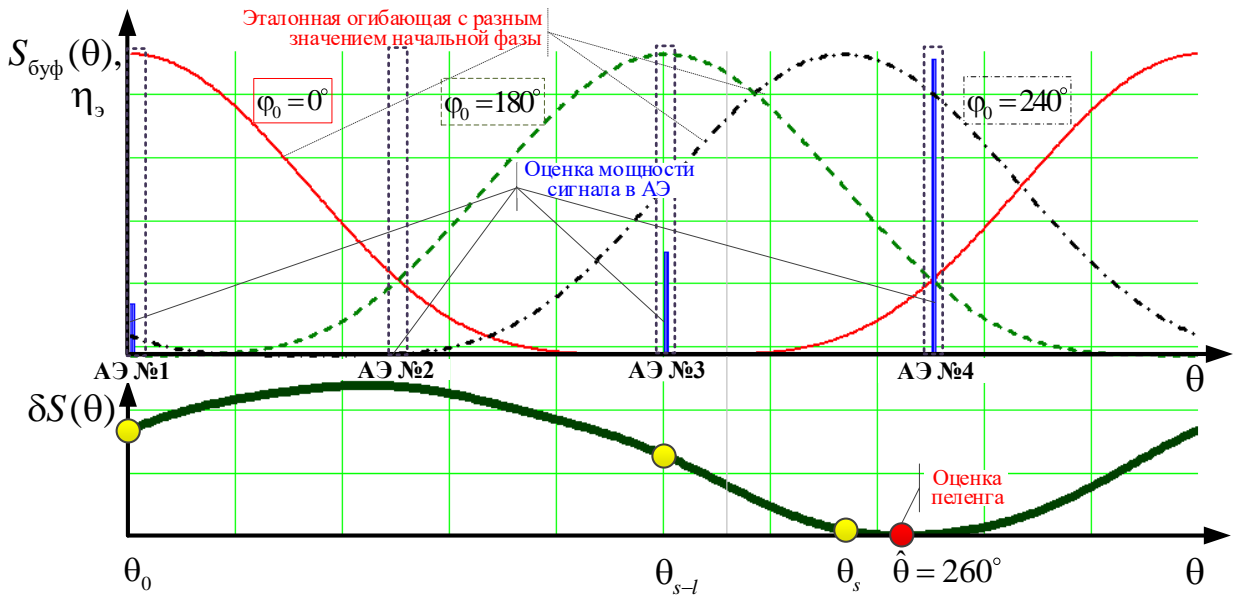


Рис. 7. Пояснение принципа расчета разовой оценки пеленга (2 и 3 этапов)

На третьем этапе оценивается разовая оценка пеленга на ИРИ (по критерию минимума средней квадратической ошибки, выражение (7)) (рис. 7) в соответствии с выражением [4]:

$$\hat{\theta}_j = \arg[\min_k(\delta S(\theta)_{j,k})], \quad (9)$$

где  $\min(\cdot)$  – функция нахождения наименьшего значения переменной.

Например, для рассматриваемого примера (рис. 7) минимальное значение  $\delta S(\theta)$  будет соответствовать направлению на ИРИ равному  $\hat{\theta} = 260^\circ$ .

Следует отметить, что использование скользящего буфера (1 этап) требует корректировки пеленга. Так, например, от второй оценки пеленга необходимо вычесть  $90^\circ$ , от третьей –  $180^\circ$  и т.д. В таком случае, выражение для расчета разовой оценки направления на ИРИ примет вид:

$$\hat{\theta}_{\text{кор } j} = \begin{cases} \hat{\theta}_j - 90 \cdot \text{mod}[(j-1), N_{\text{АЭ}}], & \text{если } \hat{\theta}_j \geq 90 \cdot \text{mod}[(j-1), N_{\text{АЭ}}]; \\ \hat{\theta}_j - 90 \cdot \text{mod}[(j-1), N_{\text{АЭ}}] + 360, & \text{если } \hat{\theta}_j < 90 \cdot \text{mod}[(j-1), N_{\text{АЭ}}], \end{cases} \quad (10)$$

где  $\text{mod}[\cdot]$  – функция вычисления остатка от деления.

На четвертом этапе усредняются разовые оценки пеленга за время контакта с ИРИ  $T_H$ :

$$\hat{\theta}_{\text{ИРИ}} = \frac{1}{N_{T_n}} \sum_{j=0}^{N_{T_n}-1} \hat{\theta}_{\text{кор}j}, \quad (11)$$

где  $N_{T_n}$  – число оценок пеленга на ИРИ за время контакта с ним  $T_n$ .

Разработанный алгоритм определения направления на БЛА позволяет формировать оценки пеленга со средним квадратическим отклонением, не превышающем  $(3-5)^\circ$  (в зависимости от условий проведения испытаний) на удалении до 1000 м [4]. Полученные значения не хуже ошибок измерения пеленга в радиопеленгаторах с четырехканальной схемой обработки принятого сигнала. В таком случае, двухканальный фазовый радиопеленгатор удовлетворяет требованиям по точности наведения средств противодействия малоразмерным БЛА. Основным недостатком двухканальной схемы, по сравнению с четырехканальной схемой построения фазового радиопеленгатора, можно отнести более высокую вероятность пропуска сигналов ИРИ с минимальной длительностью по времени. Однако, сигналы каналов радиоуправления и передачи данных БЛА излучаются постоянно, что нивелирует основной недостаток двухканального фазового радиопеленгатора.

## Заключение

1) Двухканальный фазовый радиопеленгатор обладает небольшими массогабаритными характеристиками, невысокой стоимостью по отношению к четырехканальным радиопеленгаторам аналогичного типа и минимальным энергопотреблением (5 В). Это достигается способом формирования ДНА в виде кардиоиды, суммарно-разностной обработки принятого сигнала с последовательным переключением АЭ, оценкой мощности сигнала методом периодограмм, определения пеленга на ИРИ с увеличением числа их оценок путем применения скользящего буфера (рис. 6).

2) Алгоритм определения направления на ИРИ в двухканальном фазовом радиопеленгаторе включает 4 этапа. На первом этапе использование скользящего буфера позволяет увеличить число оценок пеленга с **двух**

до 5-7 при последовательном подключении к входному контуру приемника разностного напряжения ПП и высокой частоте переключения АЭ ( $\Omega_A = 5$  кГц) для минимально возможной длительности радиосигнала канала управления БЛА  $T_{0кy} = 500$  мкс. На втором этапе определяется степень близости огибающей принятого сигнала к эталонной (выражение (7)). На третьем этапе формируется разовая оценка пеленга на ИРИ по критерию минимума средней квадратической ошибки (выражение (9)). На четвертом этапе разовые оценки пеленга усредняются за время наблюдения ИРИ для повышения точности определения его направления (выражение (11)).

3) Разработанный алгоритм определения направления на ИРИ в двухканальном фазовом радиопеленгаторе позволяет формировать оценки пеленга со средним квадратическим отклонением, не превышающем  $(3-5)^\circ$  (в зависимости от условий проведения испытаний) на удалении до 1000 м [4]. Полученные значения не хуже ошибок измерения пеленга в радиопеленгаторах с четырехканальной схемой обработки принятого сигнала.

## Литература

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. Санкт-Петербург, Научно-технологические институты. 2020. 204 с.
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты. Москва, Горячая линия–Телеком. 2017. 488 с.
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг. Задачи, методы, средства. Учебное пособие. Москва, Горячая линия–Телеком. 2012. 640 с.

4. Буйлов, Е.Н. Определение направления на источник радиоизлучения в двухканальном фазовом радиопеленгаторе с амплитудной модуляцией сигнала. MILEX.INNOVATIONS – 2023. Сборник научных статей 10-й Международной научной конференции по военно–техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного назначения. Минск, Четыре четверти. 2023. С. 31–34.
5. LimeSDR-USB User Guide: офиц. сайт. – URL: [https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB User Guide](https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB_User_Guide) (дата обращения: 20.06.2023).
6. Марпл С.Л. Марпл.-мл. СЛ Цифровой спектральный анализ и его приложения: переработанная с английского. Москва, Мир. 1990. 550 с.
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург. 2011. 768 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятности: учебник для вузов. 7-е издание. Москва, Высшая школа. 2001. 575 с.

**Для цитирования:**

Буйлов Е.Н., Солонар А.С., Бойкачев П.В., Лях Б.А., Кожобаева И.Б. Алгоритм определения направления на источник радиоизлучения в двухканальном фазовом радиопеленгаторе. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №.10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.7>