

УДК 621.396.663

А.С. Аникин, К.Е. Мухомор

## Алгоритм устранения anomalно больших ошибок в фазовом пеленгаторе с одноканальным коммутируемым приемником при работе по сканирующему источнику радиоизлучения

Проведено исследование эффективности алгоритма устранения anomalно больших ошибок пеленга при работе пеленгатора с одноканальным коммутируемым приемником по сканирующему направленному излучателю.

**Ключевые слова:** фазовый пеленгатор, коммутируемый одноканальный приемник, метод устранения неоднозначности.

В статье представлены результаты экспериментального исследования алгоритма, повышающего точность пеленгования фазовыми пеленгаторами с одноканальным коммутируемым приемником (ФП ОКП), работающим по сканирующему источнику импульсных сигналов, путем исключения из обработки импульсов, содержащих anomalно большие ошибки.

В рамках работы [3] при оценке точности пеленгования рассматриваемым типом пеленгаторов было установлено, что большой вклад в ухудшение точностных характеристик (если оценивать точность как СКО оценки пеленга) вносят anomalно большие ошибки измерения разности фаз (пеленга). Пример таких ошибок представлен на рис. 1, где показан результат расчета разности фаз при приеме сигнала вертикальной поляризации на трассе протяженностью 16 км (далее трасса №1).



Рис. 1. Разность фаз

Из рис. 1 видно, что в разности фаз присутствуют изменения разности фаз на десятки или сотни градусов в течение одного-трех импульсов (броски). Более подробно механизм возникновения подобных «бросков» представлен в [1].

Результаты работы рассматриваемого пеленгатора получены путем полунатурного моделирования, т.е. исходными данными для программ, моделирующих работу ФП ОКП, являлись данные, полученные во время проведения эксперимента на реальных трассах в 2008 г. [2].

Исследования проводились на двух трассах различного характера:

- Трасса №1 – трасса протяженностью 16 км, которую можно считать открытой.
- Трасса №2 – закрытая трасса протяженностью 29 км.

Источником излучения служила радиолокационная станция (РЛС) трехсантиметрового диапазона, работающая в режиме кругового сканирования по азимуту. Длительность излучаемых импульсов – 0,3 мкс.

Приемно-регистрирующий комплекс имел 8 антенн и отдельных приемных каналов, по 4 канала для приема сигнала вертикальной и горизонтальной поляризации. Таким образом, в данном пеленгаторе были сформированы две фазометрические базы, малая база 18 см и большая база 90 см, как показано на рис. 2, на ортогональных поляризациях приема.

Зарегистрированные данные представляют собой запись квадратурных составляющих сигнала относительно общего опорного гетеродина в каждом из приемных каналов. Квадратурные составляющие оцифровываются восьмиразрядными АЦП с тактом 11 нс и записываются в память ЭВМ [6]. Малый такт оцифровки данных позволяет работать в различных сечениях внутри импульса. Пример огибающей зарегистрированного импульса представлен на рис. 3.

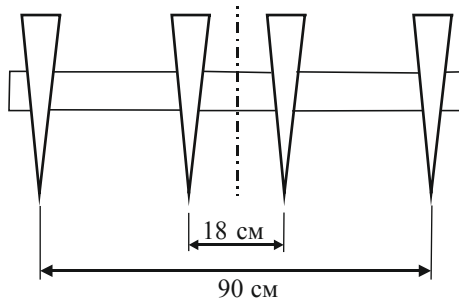


Рис. 2. Расположение антенных элементов

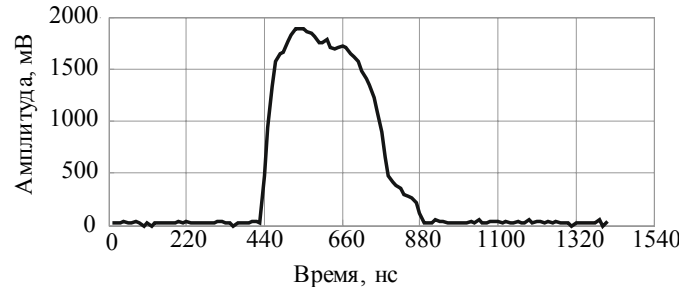


Рис. 3. Огибающая зарегистрированного импульсного сигнала

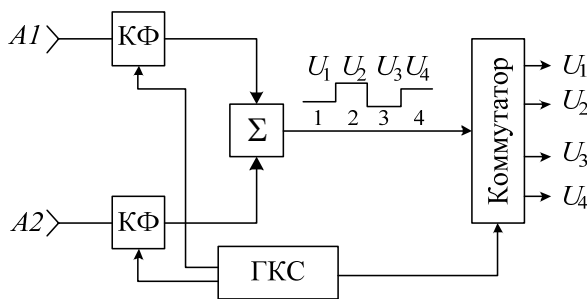


Рис. 4. Структурная схема одноканального фазового пеленгатора

Укрупненная структурная схема однобазового пеленгатора с одноканальным приемником, принятого для анализа, приведена на рис. 4, где КФ – коммутируемые фазовращатели; ГКС – генератор коммутирующих сигналов;  $\Sigma$  – сумматор.

Фазовращатели вносят фазовые сдвиги, равные  $0, 90^\circ$  или  $180^\circ$ , в моменты времени  $t_i = T_k(i-1), i=1..4$ , задаваемые генератором коммутирующих сигналов. Приводя вносимые фазовые сдвиги  $\varphi_i$  к одному каналу, запишем:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}(i-1), \quad i=1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

Амплитуду суммарного сигнала на  $i$ -м такте переключения можно найти по теореме косинусов

$$U_i = U_0 \cdot \left| \cos \frac{\varphi - (i-1) \cdot \frac{\pi}{2}}{2} \right|, \quad i=1..4, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – искомая разность фаз сигналов на антеннах;  $U_0$  – амплитуда входного сигнала.

Таким образом, последовательно во времени с тактом  $T_k$  формируется четыре СВЧ-сигнала с амплитудами:

$$\begin{cases} U_1 = U_0 \cdot \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|; U_2 = U_0 \cdot \left| \cos \left( \frac{\varphi}{2} - 45^\circ \right) \right|; \\ U_3 = U_0 \cdot \left| \cos \left( \frac{\varphi}{2} - 90^\circ \right) \right|; U_4 = U_0 \cdot \left| \cos \left( \frac{\varphi}{2} - 135^\circ \right) \right|. \end{cases} \quad (3)$$

Пара уравнений из совокупности (3) позволяет вычислить разность фаз  $\varphi$ . Например, используя  $U_1$  и  $U_3$ , получаем

$$\varphi = 2 \arctan \frac{U_3}{U_1} = 2 \arctan \frac{\left| \cos \left( \frac{\varphi}{2} - 90^\circ \right) \right|}{\left| \cos \left( \frac{\varphi}{2} \right) \right|}. \quad (4)$$

Подробное описание рассматриваемого фазового пеленгатора можно найти в [5].

При моделировании период коммутации составлял 11 нс, точка сечения (время первого отсчета  $U$ ) – через 70 нс от начала импульса.

Для малой базы пеленгатора сектор однозначности равен 10 град на частоте 9 ГГц, для большой базы пеленгатора – 2 град. Для устранения неоднозначности необходимо определить целое число периодов разности фаз –  $k$  на большой базе [4]:

$$k = \left[ \varphi_{\text{МБ}} \cdot \frac{l_{\text{ББ}}}{l_{\text{МБ}}} - \varphi_{\text{ББ}} \right], \tag{5}$$

где  $[\cdot]$  – оператор округления до ближайшего целого;  $\varphi_{\text{МБ}}$  – разность фаз на малой базе;  $N_{\text{искл}}/N_{\text{общ}}$ ;  $l_{\text{МБ}}$  – малая база;  $\varphi_{\text{ББ}}$  – разность фаз на большой базе;  $l_{\text{ББ}}$  – большая база.

Алгоритм разрешения неоднозначности (5) состоит в следующем: выбирается целое число периодов разности фаз на большой базе  $k^*$ , при котором пеленги на большой и на малой базах различаются не более чем на половину сектора однозначности по большой базе, равного  $\lambda/l_2$ . Такое число  $k^*$  при использовании алгоритма (5) всегда найдется, хотя оно может соответствовать anomalно большим ошибкам пеленгования.

Пример применения алгоритма (5) в рассматриваемом пеленгаторе представлен на рис. 5.

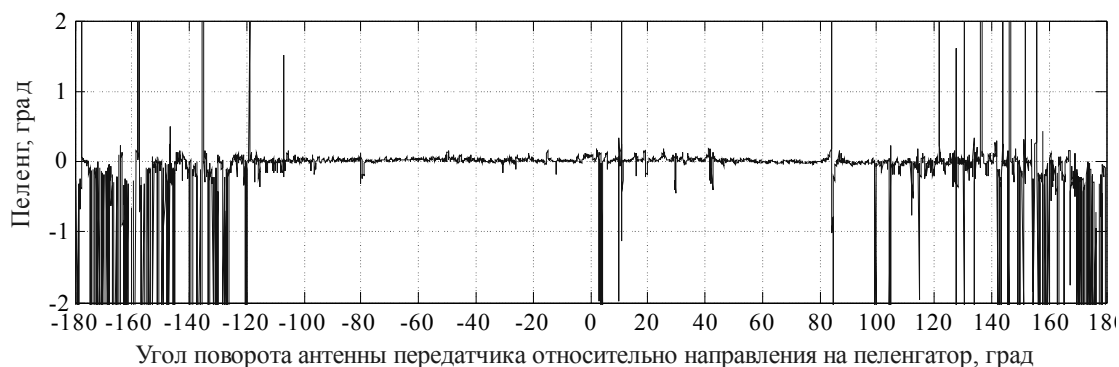


Рис. 5. Пеленг, полученный ФП ОКП после устранения неоднозначности измерений

Можно исключать из обработки самые грубые измерения, положив, что угловая разница между отсчетами разностей фаз по точной и грубой базам не должна превосходить некоторый порог  $\Delta$ , меньше  $\lambda/2l_2$  [3]. Алгоритм устранения неоднозначности при этом определяется выражением (6) и состоит в следующем: выбирается целое число периодов разности фаз на большой базе  $k^*$ , при котором выполняется неравенство

$$\left| \varphi_1 \frac{l_2}{l_1} - (\varphi_2 + 2\pi k^*) \right| \frac{1}{2\pi} < \Delta. \tag{6}$$

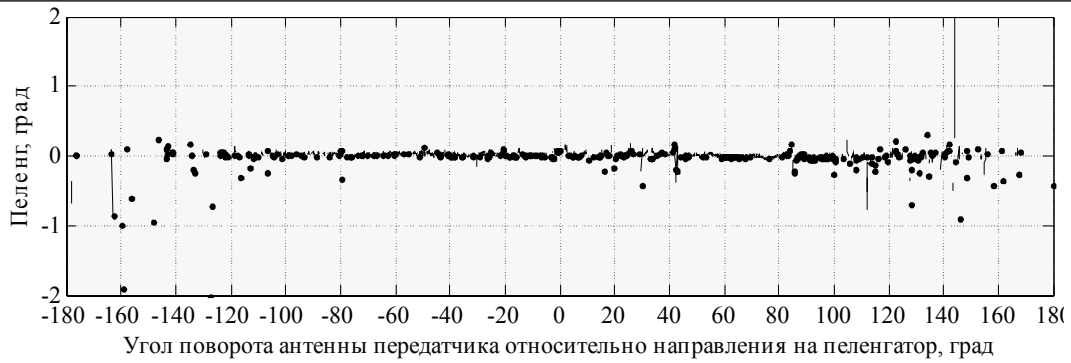
Измерения, для которых соотношение (6) не выполняется, отбрасываются.

Отметим, что при построении пеленгатора по схеме с коммутируемым одноканальным приемником в отличие от его традиционного построения на результат измерения влияют не только искажения фазового фронта радиоволны, но и амплитудные флуктуации сигнала, проявляющиеся в течение длительности импульса. Таким образом, отдельное рассмотрение пеленгатора такого типа в реальных условиях распространения радиоволн представляет интерес.

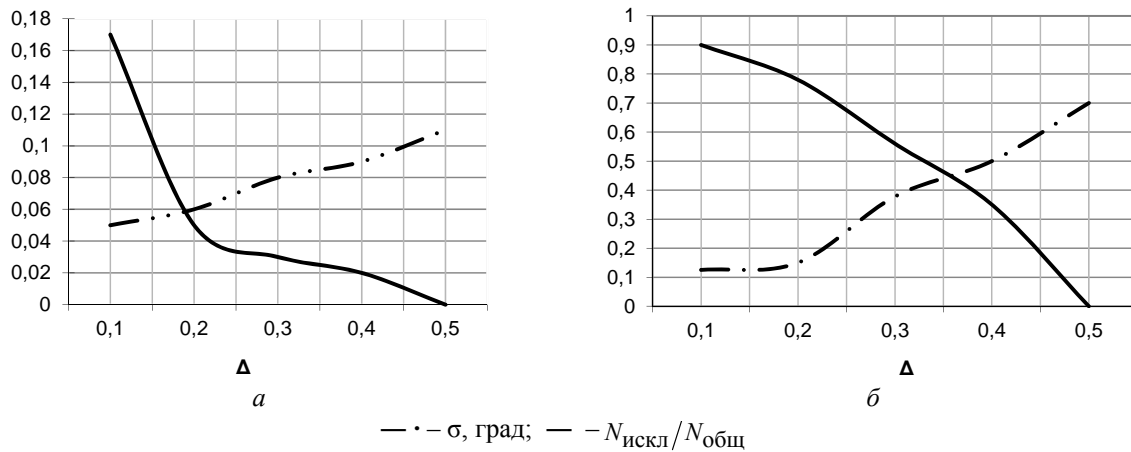
Примеры использования алгоритма (6) для различных значений порога представлены на рис. 6 и 7.



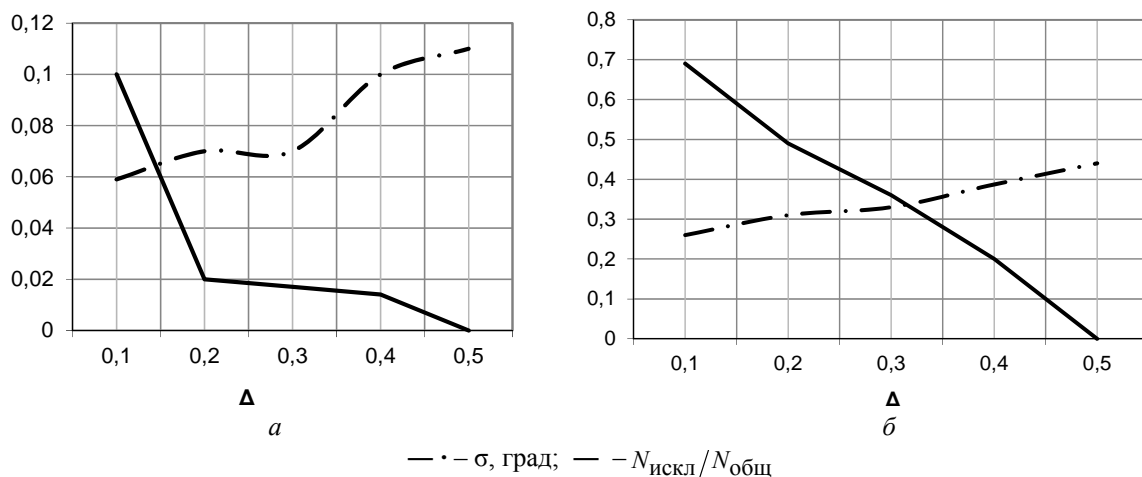
Рис. 6. Пеленг, полученный ФП ОКП при  $\Delta = 0,3$

Рис. 7. Пеленг, полученный ФП ОКП при  $\Delta = 0,1$ 

На рис. 8 представлены зависимости СКО оценки пеленга и количества исключаемых из обработки отсчетов (как отношение количества исключенных импульсов к общему количеству зарегистрированных импульсов  $N_{\text{искл}}/N_{\text{общ}}$ ) в зависимости от значения порога  $\Delta$ , для трасс №1 и №2 соответственно.

Рис. 8. Зависимость СКО и  $N_{\text{искл}}/N_{\text{общ}}$  от порогового значения  $\Delta$  при приеме сигнала вертикальной поляризации: *a* – для трассы №1 протяженностью 16 км; *б* – для трассы №2 протяженностью 29 км

Зависимость СКО оценки пеленга и  $N_{\text{искл}}/N_{\text{общ}}$  при приеме кроссполяризованного сигнала для исследуемых трасс представлены на рис. 9.

Рис. 9. Зависимость СКО и количества исключаемых из обработки импульсов от порогового значения  $\Delta$  при излучении сигнала вертикальной поляризации и приеме сигнала горизонтальной поляризации: *a* – для трассы №1 протяженностью 16 км; *б* – для трассы №2 протяженностью 29 км

В таблице представлены результаты расчета пеленга, полученные ФП ОКП при использовании обычного алгоритма устранения (5) и измененного (6) на исследуемых трассах. Результаты, представленные в таблице, получены при обработке данных, зарегистрированных в согласованных по поляризации приема антеннах.

На трассе №2 данные обрабатывались в секторе углового положения антенны источника излучения  $\pm 20^\circ$  относительно направления на пеленгатор, в других угловых секторах провести обработку не позволила чувствительность приемных устройств.

#### Значения СКО и количество «отбракованных» отсчетов при различных значениях порога $\Delta$

|              |                                     | Оцениваемый параметр, ед.           | Трасса    |           |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|
|              |                                     |                                     | №1, 16 км | №2, 29 км |
| Алгоритм (5) | $\Delta=0,5$                        | СКО оценки пеленга, град            | 0,11      | 0,7       |
|              | $\Delta=0,4$                        | СКО оценки пеленга, град            | 0,09      | 0,5       |
| Алгоритм (6) | $\Delta=0,4$                        | Процент «выпавших» отсчетов пеленга | 2         | 35        |
|              |                                     | СКО оценки пеленга, град            | 0,08      | 0,38      |
|              | $\Delta=0,3$                        | Процент «выпавших» отсчетов пеленга | 3         | 56        |
|              |                                     | СКО оценки пеленга, град            | 0,06      | 0,15      |
|              | $\Delta=0,2$                        | Процент «выпавших» отсчетов пеленга | 5         | 78        |
|              |                                     | СКО оценки пеленга, град            | 0,05      | 0,13      |
| $\Delta=0,1$ | Процент «выпавших» отсчетов пеленга | 17                                  | 90        |           |

Из рис. 8 и 9, а также данных таблицы видно, что уменьшение  $\Delta$  от 0,2 до 0,1 не дает ощутимого улучшения точности, но резко увеличивает количество исключаемых из обработки отсчетов.

**Выводы.** Использование модернизированного алгоритма устранения неоднозначности в фазовом пеленгаторе с одноканальным коммутируемым приемником позволило ощутимо уменьшить среднеквадратическую ошибку пеленгования. Эффективность применения предлагаемого алгоритма на наземных трассах зависит от ряда факторов: характера трассы распространения, отношения сигнал/шум, ориентации антенной системы источника излучения.

Так, на трассе №1 протяженностью 16 км было достигнуто двукратное уменьшение СКО оценки пеленга при исключении из обработки 20% отсчетов. Для трассы № 2 (29 км) было достигнуто пятикратное улучшение точности пеленгования при исключении 80–90% отсчетов.

К достоинствам алгоритма можно отнести и тот факт, что его применение не ведет к существенному изменению или усложнению аппаратуры в сравнении с традиционным построением.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 12-08-31315 мол\_а.

#### Литература

1. Анализ зависимости разности фаз на антеннах фазового радиопеленгатора от ориентации направленной антенны источника радиоизлучения в условиях пересечённой местности / А.С. Аникин, В.П. Денисов, Н.А. Колядин, М.В. Крутиков // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 2 (28). – С. 5–14.
2. Экспериментальные исследования антенной системы фазового пеленгатора на наземных трассах / В.П. Денисов, Н.А. Колядин, М.В. Крутиков, М.П. Скородумов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 1(19). – Ч. 1. – С. 7–15.
3. Устранение аномально больших ошибок в двухбазовых фазовых пеленгаторах, работающих по сканирующему источнику излучения / В.П. Денисов, Н.А. Колядин, К.Е. Мухомор, М.П. Скородумов // Радиотехника. – 2013. – № 2. – С. 10–17.
4. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.
5. Влияние трассы распространения радиоволн на точность пеленгования фазовым пеленгатором с одноканальным коммутируемым приемником / О.П. Ванеев, В.П. Денисов, К.Е. Мухомор, В.В. Травин // Вопросы радиоэлектроники (Москва). – 2009. – № 2. – С. 37–46.
6. Ровкин М.Е. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временного искажения радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах / М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков, М.В. Осипов и др. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – № 6. – С. 7–11.

**Аникин Алексей Сергеевич**

Аспирант каф. радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Мл. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8-906-957-95-83

Эл. почта: rbk@sibmail.com

**Мухомор Кирилл Евгеньевич**

Науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-89

Эл. почта: joyzef@ngs.ru

Anikin A.S., Mukhomor K.E.

**The eliminating abnormally large errors algorithm in the phase, working on the scan radiation source**

A study of the influence of the eliminating abnormally large bearing measurement error algorithm based on the algorithm of the disambiguation phase measurements on the accuracy of direction finder with single-channel switched receiver.

**Keywords:** phase direction finder, single-channel switched receiver, the method of disambiguation.

---