

УДК 621.396.67

# ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИМ ПЕЛЕНГАТОРОМ

**С. Н. Шаров,**

доктор техн. наук, начальник научно-аналитического отдела  
Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦНИИ «Гранит»»

Приводится описание программы исследований точности измерения параметров движения носителя источника радиоизлучения при помощи радиопеленгатора, расположенного на маневрирующем носителе. Рассмотрены различные алгоритмы обработки результатов измерений текущего пеленга и даны рекомендации по их использованию в различных тактических ситуациях.

The description of the program of investigations of accuracy of measurement of parameters of moving of a bearer of radiation source by means of a direction finder onboard a maneuvering bearer is listed. Different algorithms of processing of the current bearing measurement results are examined and recommendations on their use in different tactical situations are made.

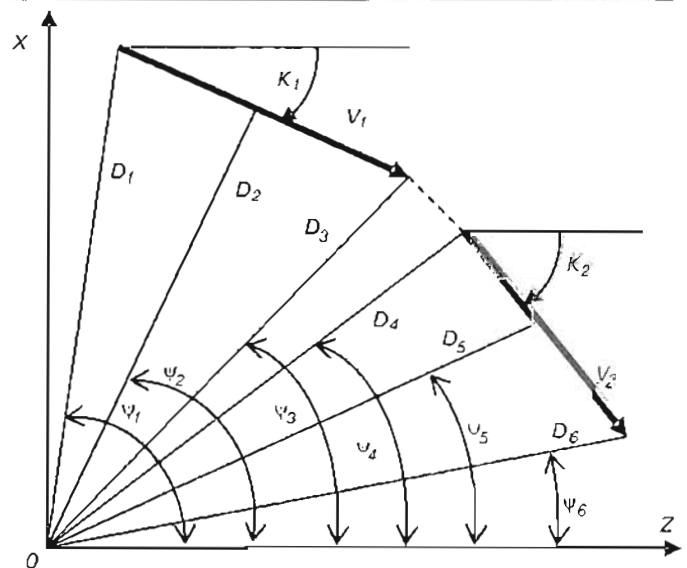
Пассивные средства находят широкое применение в системах корабельной навигации, охранных системах и системах целеуказания ракетного оружия (РО), так как обладают наибольшей дальностью обнаружения цели, имеющей источник радиоизлучения, и скрытностью своей работы [1, 2]. Основным их недостатком по сравнению с активными средствами является невозможность точного определения дистанции до цели. Точность измерения дистанции до цели, достаточная для применения РО по подвижным целям, достигается использованием двух или более пеленгаторов, разнесенных друг от друга на известное расстояние, соизмеримое с дистанцией до цели. Это существенно снижает возможности автономной работы одного корабля-носителя РО по подвижным целям. Выходом из этого положения может служить то обстоятельство, что пеленгатор целеуказания может наблюдать источник излучения некоторое время (иметь возможность наблюдать изменяющийся пеленг) и при этом совершать маневр, изменяя свой курс.

Для оценки точности измерения дистанции и курса движения цели, имеющей источник излучения, при помощи одного пеленгатора, находящегося на подвижном носителе, предлагается разработанная в среде *Matlab* программа моделирования.

## Метод измерения параметров

Идея метода измерения параметров движения источника излучения поясняется на рис. 1.

Предположим, что на некотором интервале времени источник излучений движется прямолинейно с постоянной скоростью  $V_u$  и носитель пеленгатора прямолинейно со скоростью  $V_{н1}$ . Их относительная скорость  $V_1 = V_u + V_{н1}$  с курсовым углом  $K_1$ . (Здесь и далее в тексте жирным шрифтом выделяются векторные величины, а обычным – скалярные). На этом интервале времени делается три измерения пеленга –  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  через интервалы времени  $\Delta t_{2-1}$  и  $\Delta t_{3-2}$ .



■ Рис. 1. Метод измерения параметров движения источника излучения

После этого носитель пеленгатора изменяет свой курс, например, на противоположный, двигаясь далее снова прямолинейно с постоянной скоростью  $V_{H2}$  и снова делает три измерения пеленга –  $\psi_4, \psi_5, \psi_6$  через интервалы времени  $\Delta t_{5-4}$  и  $\Delta t_{6-5}$ . Теперь относительная скорость движения источника излучения и пеленгатора  $V_2 = V_{\text{ц}} + V_{H2}$  с курсовым углом  $K_2$ .

Таким образом, при принятых допущениях имеем шесть замеров пеленга, известные скорости носителя  $V_{H1}$  и  $V_{H2}$ , соответственно их модули и курсовые углы  $K_{H1}$  и  $K_{H2}$ . Это дает принципиальную возможность определить дистанции  $D_1 - D_6$  до источника излучения, скорость  $V_{\text{ц}}$  и курсовой угол  $K_{\text{ц}}$  движения источника излучения.

Одна серия замеров позволит составить четыре уравнения с пятью неизвестными параметрами ( $D_1, K_1, V_1, K_{\text{ц}}, V_{\text{ц}}$ ), например:

$$\begin{cases} \text{tg } \psi_2 = (D_1 \sin \psi_1 - V_1 \Delta t_{2-1} \sin K_1) / (D_1 \cos \psi_1 - V_1 \Delta t_{2-1} \cos K_1); \\ \text{tg } \psi_3 = (D_1 \sin \psi_1 - V_1 \Delta t_{3-1} \sin K_1) / (D_1 \cos \psi_1 - V_1 \Delta t_{3-1} \cos K_1); \\ V_1 \sin K_1 = V_{\text{ц}} \sin K_{\text{ц}} + V_{H1} \sin K_{H1}; \\ V_1 \cos K_1 = V_{\text{ц}} \cos K_{\text{ц}} + V_{H1} \cos K_{H1} \end{cases} \quad (1)$$

Необходима вторая серия измерений, для которой справедливы аналогичные соотношения

$$\begin{cases} \text{tg } \psi_5 = (D_6 \sin \psi_6 - V_2 \Delta t_{6-5} \sin K_2) / (D_6 \cos \psi_6 - V_2 \Delta t_{6-5} \cos K_2); \\ \text{tg } \psi_4 = (D_6 \sin \psi_6 - V_2 \Delta t_{6-4} \sin K_2) / (D_6 \cos \psi_6 - V_2 \Delta t_{6-4} \cos K_2); \\ V_2 \sin K_2 = V_{\text{ц}} \sin K_{\text{ц}} + V_{H2} \sin K_{H2}; \\ V_2 \cos K_2 = V_{\text{ц}} \cos K_{\text{ц}} + V_{H2} \cos K_{H2}. \end{cases} \quad (2)$$

Решение уравнений (1) и (2) однозначно определяет искомые значения параметров носителя источника излучения – цели (дистанцию до цели в момент последнего измерения пеленга  $D_6$ , курсовой угол  $K_{\text{ц}}$  и скорость  $V_{\text{ц}}$ ).

Исследование чувствительности решений уравнений (1) и (2) показывают, что точность определения искомых параметров существенно зависит от параметров измерителя (точность измерения пеленга), ракурса движения цели и пеленгатора (относительное изменение пеленга), их скоростей и т. д. Надежды на получение хороших результатов по точности дает возможность получения значительного числа измерений, однако это связано с увеличением времени наблюдения, с одной стороны (что может оказаться недопустимым), и получением приращеня пеленга существенно меньше, чем ошибка пеленгования, что также внушает опасение на получение приемлемой точности искомых параметров

### Интерфейс программы

Основное поле программы для пользователя оформлено в виде пульта стенда моделирования, показанного на рис. 2. На пульте в верхней части имеется шесть кнопок для ввода условий исследований. Надпись на каждой кнопке соответствует ее назначению.



При нажатии на кнопку раскрываются соответствующие окна, примеры которых показаны на рис. 3, а–д. При нажатии первой кнопки «Параметры носителя» (рис. 3, а) открывается окно ввода параметров движения носителя пеленгатора или пассивного радиопеленгационного канала (ПРК). В этом окне вводятся начальные координаты носителя  $X_0, Y_0$ , курсовой угол для первой и второй серии измерений пеленга, параметры маневра (радиус и угловая скорость) при изменении курса, время, интервал и число измерений для первой и второй серии. После установки значений нажатием кнопки «Ввести» установленные 15 параметров запоминаются вектором  $Q_N$ .

Погрешности пеленгования источника излучения вводятся при помощи окна (рис. 3, б), открываемого кнопкой «Неточности пеленгации» (рис. 3, б). В этом окне имеется возможность ввести значение систематической погрешности для всех измерений, среднеквадратическое значение случайной ошибки (СКО), распределенной по нормальному закону, коэффициент корреляции ошибки измерений пеленга, амплитуду, частоту и фазу периодической составляющей погрешности.

Нажатием кнопки «Ввести» этого окна установленные шесть параметров запоминаются вектором  $Q_E$ .

При помощи кнопки «Параметры движения цели» (окно, представленное на рис. 3, в) устанавливаются начальные координаты  $X_0, Y_0$  цели в момент первого измерения пеленга, курс  $K_{\text{ц}}$  и скорость  $V_{\text{ц}}$  цели. Командой «Ввести» формируется вектор  $Q_C$  параметров цели. В программе имеется возможность исследовать различные алгоритмы обработки результатов измерений, выбрать которые можно при помощи окна (рис. 3, г), раскрываемого кнопкой «Алгоритмы обработки замеров». Здесь знаком «v» необходимо отметить один из предлагаемых алгоритмов;

а) 1. Исходные данные носителя ПРК

### ПАРАМЕТРЫ НОСИТЕЛЯ

Начальное положение  $X_0 = 0$  м  $Y_0 = 0$  м

Курсовой угол и скорость  $K_1 = -10$  град  $V_1 = 50$  м/с

Время и интервал измерений 1 сеанса  $T_1 = 100$  с  $d_1 = 5$  с

Число измерений на первом курсе  $N_1 = 100$  штук

Время, радиус, угол, скорость маневра  $T_m = 100$  с  $R_m = 500$  м  $K_m = 1.5$  град/с

Курсовой угол и скорость 2 сеанса  $V_2 = 50$  м/с  $K_2 = 170$  град

Время наблюдения на втором курсе  $T_2 = 100$  с  $d_2 = 5$  с

Число измерений на втором курсе  $N_2 = 100$  штук

Ввести

б) УЧЁТ НЕТОЧНОСТИ ПЕЛЕНГАЦИИ

Систематическая погр.  $E_s = 0.5$  град

Случайная погр.  $E_p = 0.1$  град

Коэффициент корреляции  $K_r = 0.0$

Периодическая погр. Амплитуда  $0.001$  град

Частота колебаний  $F_p = 0.1$  Гц

Фаза  $\text{faza} = 0.001$  град

Ввести

в) 2. Параметры цели

### ВВОД ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛИ

Начальное положение цели относительно измерителя  $X_{c0} = 20000$  м  $Y_{c0} = 2000$  м

Курс цели  $K_c = -30$  град

Скорость цели  $V_c = 200$  м/с

Ввести

г) АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Без фильтрации

Линейная аппроксимация

Квадратичная аппроксимация

Кубическая аппроксимация

Усреднение на скользящем интервале

Усреднение на скользящем интервале с доп. обработкой

Нелинейный фильтр 2-го порядка

Нелинейный фильтр 4-ого порядка

$N$  - число измерений пеленга

Число измерений  $(2 \cdot N/3)$  для усреднения  $N_{\Phi} = 21$  штук

Число измерений  $(2 \cdot N/3)$  для усреднения  $N_{\Phi} = 21$  штук

Постоянная интегрирования  $(1 - N/10)$   $N_{\Phi} = 10$  штук

Постоянная интегрирования  $(1 - N/10)$   $N_{\Phi} = 5$  штук

Ввести

д) Представление результатов моделирования

Число испытаний  $(1 - 1000)$   $st = 1$  шт

Вывод графиков ошибок пеленгации  $1$  серия измерений (измеренных и обработанных)  $1(0)$   $2$  серия измерений

Вывод  $(1)$  измеренных параметров движения цели и их СКО

$D_{ц} = 6$  км  $K_{ц} = 0$  град  $V_{ц} = 0$  м/с

$SKO_{D_{ц}} = 1$  %  $SKO_{K_{ц}} = 1$  %  $SKO_{V_{ц}} = 1$  %

$SKO_{D_{ц}} = 0$  км  $SKO_{K_{ц}} = 0$  град  $SKO_{V_{ц}} = 0$  м/с

Вывод  $(1)$  результатов (при  $st=10$ ) ошибок измерения параметров цели

$\Delta D_{ц} = 0$   $\Delta K_{ц} = 0$   $\Delta V_{ц} = 0$

Ввести

Рис. 3. Примеры диалоговых окон: а – ввода параметров движения носителя пеленгатора или ПРК; б – ввода погрешностей пеленгования источника излучения; в – ввода начальных координат, курса и скорости цели; г – выбора алгоритмов обработки результатов измерений; д – выбора вывода и формы представления результатов

- без фильтрации измеренных значений пеленга;
- линейная аппроксимация;
- квадратичная аппроксимация;
- кубическая аппроксимация;
- усреднение на скользящем интервале  $N_{\Phi}$ ;
- усреднение на скользящем интервале  $N_{\Phi}$  с дополнительной обработкой;

- нелинейная фильтрация с линейной частью 2-го порядка и постоянной  $N_{\Phi}$ ;
  - нелинейная фильтрация 4-го порядка с характерным параметром  $N_{\Phi}$ .
- Аналогично предыдущему выбранный алгоритм и значение его параметра  $N_{\Phi}$  формируют вектор  $Q_d$ . Вывод и форма представления результатов выбираются при помощи следующего окна, раскрыва-

емого кнопкой «Представление результатов моделирования» (рис. 3, д). Здесь оператором задается число статистических испытаний, необходимость вывода графика введенных ошибок измерения и результатов их обработки для первой и второй серий измерений. В качестве основных результатов исследований обеспечивается вывод СКО в процентах и физических величинах для дистанции, курса и скорости движения цели. Имеется возможность вывода гистограмм этих ошибок.

По команде «Диспетчер стенда» на графическое поле управляющего окна (см. рис. 2) в координатах X, Y выводится график движения носителя и цели с заданными ранее параметрами. На этом графике также указываются отдельные пеленги или зоны пеленгации источника излучения первого и второго сеансов. Это позволяет наглядно представить тактическую ситуацию и при необходимости изменить исходные данные маневра цели и носителя.

Подготовка исходных данных для моделирования заключается в следующем. Сначала определяются истинные значения пеленгов для заданных параметров движения цели и носителя. Затем формируется массив значений «реальных» измерений с учетом заданных ошибок измерения. Эти операции являются предварительными и проводятся для всех возможных вариантов обработки результатов измерений. Далее по ним при помощи одного из перечисленных способов необходимо найти значение параметров движения цели и оценить ошибки их определения относительно истинных значений. Рассмотрим кратко эти способы.

### Обработка результатов измерений без фильтрации

Этот способ предполагает проведение вычислений со значениями «реальных» измерений без их предварительной обработки. Если погрешность измерения пеленга превосходит изменение пеленга от одного измерения к другому, то никаких правдоподобных результатов в определении параметров движения цели ожидать не следует. Однако при большом количестве измерений  $N$  (например,  $N \geq 100$ ) в каждой серии число троек пеленгов, по которым решается задача, определяется числом  $C$  возможных сочетаний из  $N$  по 3. Например, для  $N = 100$  число независимых решений уравнений (1) или (2) составит  $C = 161700$ . Таким образом, мы имеем достаточную выборку для определения средних значений искомых параметров.

Отметим особенности уравнений (1) и (2), которые справедливы для любых трех измерений каждой серии.

Значение относительного курса  $K_1$  определяется как корень трансцендентного уравнения.

$$\frac{t_{2-1} \cdot \sin(\psi_2 - K_1)}{t_{3-1} \cdot \sin(\psi_3 - K_1)} = \frac{\sin(\psi_2 - \psi_1)}{\sin(\psi_3 - \psi_1)} = 0 \quad (3)$$

Аналогичным уравнением определяется значение  $K_2$  по пеленгам второй серии. При числе измерений  $N$  число уравнений, из которых можно найти значение  $K_1$  и  $K_2$ , определяется числом  $C$  возможных сочетаний из  $N$  по 3.

Среднее значение относительного курса соответственно определяется как

$$K_1 = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C K_{1i}; \quad K_2 = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C K_{2i}. \quad (4)$$

В формулах (4) число  $N$  (соответственно  $C$ ) измерений пеленга принято одинаковым для обеих серий измерений.

После определения значений  $K_1$  и  $K_2$  определяется значение измеренного курсового угла цели  $K_u$ :

$$\frac{V_{u2} \cdot \sin(K_{u2} - K_2)}{V_{u1} \cdot \sin(K_{u1} - K_1)} - \frac{\sin(K_2 - K_u)}{\sin(K_1 - K_u)} = 0. \quad (5)$$

Далее из уравнения (2) определим скорость цели  $V_u$ :

$$V_u = V_{u2} \frac{\sin(K_{u2} - K_2)}{\sin(K_2 - K_u)} \quad (6)$$

и относительную скорость  $V_2$ :

$$V_2 = V_{u2} \frac{\sin(K_u - K_2)}{\sin(K_u - K_{u2})}. \quad (7)$$

Обозначим  $D_k$  искомую дистанцию до цели на последнем пеленге. Каждая пара пеленгов последней серии (один пеленг  $\psi_i$  и последний пеленг  $\psi_k$ ) позволяют определить значение последней дистанции  $D_{ki}$  до цели:

$$D_{ki} = V_2 \Delta t_{i-k} \frac{\sin(K_2 - \psi_i)}{\sin(\psi_i - \psi_k)}, \quad (8)$$

где  $\Delta t_{i-k}$  – интервал времени между измерением  $\psi_i$  и  $\psi_k$  пеленгов.

За измеренную величину принимается среднее значение искомой дистанции  $D_k$ :

$$D_k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} D_{ki}. \quad (9)$$

Приведенные уравнения (3) – (9) определяют значения параметров движения цели относительно пеленгатора для каждого опыта с заданными статистическими характеристиками погрешностей измерения.

Для получения корректной статистической оценки необходимо значительное число статистических испытаний. Описываемая программа позволяет проводить необходимое задаваемое число испытаний и по их результатам определять статистические характеристики погрешностей определения параметров (относительные и абсолютные значения ошибок и их гистограммы). Необходимые для этого соотношения известны и в настоящей статье не приводятся. Результаты вычислений выводятся в рабо-

чее окно *Matlab*, а гистограммы – в графические окна.

**Предварительная обработка результатов путем аппроксимации измеренных значений пеленга**

Снизить влияние погрешности измерения пеленга на ошибки определения параметров движения цели можно различными способами. Наиболее распространенный способ – использование гипотезы плавного изменения пеленга по линейному, квадратичному или более сложному, но известному закону. В программе предусмотрена возможность исследования ошибок определения параметров движения цели для трех видов аппроксимации закона изменения пеленга: полиномом первой, второй и третьей степени.

При кубической аппроксимации для каждой серии измерений пеленга накладывается условие

$$\psi_{ai} = a_0 + a_1i + a_2i^2 + a_3i^3, \quad (10)$$

где  $\psi_{ai}$  – аппроксимированное значение  $i$ -го пеленга в серии измерений;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты полинома аппроксимации

Для линейной аппроксимации используется полином первой степени ( $a_2 = 0$  и  $a_3 = 0$ ), а для квадратичной – второй степени ( $a_3 = 0$ ).

Подбор коэффициентов аппроксимации проводится по методу наименьших квадратов. В среде *Matlab* это реализуется различными способами. В программе для кубической аппроксимации этот метод реализован оператором поиска минимума

$$M = fminsearch('f_{a3}', [a_0, a_1, a_2, a_3]),$$

где  $f = \sum_{i=1}^N (\psi_i - \psi_{ai})^2$  – минимизируемая функция;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты полинома начального приближения, значения которых следующие:

$$a_0 = \psi_1; \quad a_1 = (\psi_N - \psi_1)/N; \quad a_2 = 0; \quad a_3 = 0.$$

При линейной и квадратичной аппроксимации используются соответственно функции  $f_{a1}$  и  $f_{a2}$  полиномов первого и второго порядка.

После аппроксимации первой и второй серии пеленгов значения  $\psi_i$  заменяются на  $\psi_{ai}$ . Далее определение параметров движения цели аналогично описанному в предыдущем разделе.

**Усреднение на скользящем интервале**

В ряде случаев изменение пеленга происходит значительно более медленно, чем флуктуация ошибки измерения. Здесь следует усреднять быстрые изменения на некотором интервале времени. В устройствах обнаружения сигнала на фоне шума и других измерительных устройствах распространен способ усреднения на скользящем интервале. В

программе этот способ реализован следующим образом.

Оператор в окне «Алгоритмы обработки результатов измерений» выбирает значение интервала усреднения  $T_\Phi = N_\Phi$  – число измерений, по которым проводится усреднение. Желательно, чтобы это число было нечетным, в противном случае интервал усреднения будет на единицу больше.

Отфильтрованные показания пеленгов  $\psi_{\Phi i}$  определяются следующим образом.

$$\psi_{\Phi i} = \frac{1}{T_\Phi} \sum_{j=i-T_{\Phi 2}}^{j=i+T_{\Phi 2}} \psi_j, \quad (11)$$

где  $T_{\Phi 2} = \text{Fix}(T_\Phi/2)$

Число пеленгов, участвующих в определении параметров движения цели (3)–(9), сокращается и становится равным  $(N - T_\Phi + 1)$ .

Отметим, что для каждого набора исходных данных можно подобрать значение  $T_\Phi$ , при котором ошибки определения параметров движения цели будут минимальными.

Как показали результаты моделирования, существенный вклад в погрешности определения параметров цели вносят отдельные выбросы, которые начинают проявляться при определении относительных курсовых углов, определяемых по формуле (3).

Дополнительная обработка результатов измерений в этом случае заключается в корректировке значений  $K_1$  и  $K_2$ , вычисляемых по формулам (4) путем исключения тех значений  $K_1$  и  $K_2$ , которые отклонились от среднего значения на величину более чем  $3\sigma$ . В программе предусмотрена возможность просмотра гистограммы значений  $K_1$  и  $K_2$  до и после корректировки, а также возможность изменения величины порога исключения.

**Нелинейная фильтрация**

В практике обработки сигналов широкое применение находят линейные фильтры, теория которых хорошо разработана. Если спектр флуктуаций помехи и изменения сигнала отличаются друг от друга, то интегрирующие, апериодические и полосовые фильтры являются оптимальными и дают наилучший результат. Однако для координатных измерений линейные фильтры не используются, так как дают погрешность, обусловленную фазовым сдвигом.

В работе [4] предложен нелинейный фильтр, основанный на принципе нелинейного корректирующего звена или системы с переменной структурой. Нелинейный дискретный фильтр имеет амплитудную характеристику апериодического звена второго порядка и фазовую характеристику идеального звена. Такой фильтр практически не дает фазового сдвига за счет последовательного интегрирования в прямом и обратном направлении.

В нелинейном фильтре 2-го порядка реализована предварительная обработка значений измерен-



ных пленгов в соответствии с дискретным аналогом аperiodического звена:

$$\begin{cases} \psi_{\Phi}(j+1) = \psi_{\Phi}(j) + (\psi_{\Phi}(j+1) - \psi_{\Phi}(j)) / T_{\Phi} \\ \text{— при изменении } j \text{ от } 1 \text{ до } N-1; \\ \psi_{\Phi 1}(j) = \psi_{\Phi 1}(j+1) + (\psi_{\Phi}(j) - \psi_{\Phi 1}(j+1)) / T_{\Phi} \\ \text{— при изменении } j \text{ от } N-1 \text{ до } 1. \end{cases} \quad (12)$$

Программа позволяет значение  $T_{\Phi}$  выбирать в зависимости от исходных данных, добиваясь минимальных погрешностей искоемых параметров.

Следует отметить, что для такого фильтра на граничных пленгах серии измерений имеется переходный процесс. По этой причине число измеренных пленгов, участвующих в вычислении относительных курсовых углов и далее параметров движения цели, сокращается до  $N-6 T_{\Phi}$  (по  $2 \sum 3 T_{\Phi}$  с каждого края).

Более глубокую фильтрацию можно достичь повышением порядка линейной части фильтра, т. е. проводить интегрирование два раза в прямом и два раза в обратном направлении. Это реализовано в программе с нелинейным фильтром 4-го порядка. Однако при этом сокращается число пленгов, участвующих в определении параметров движения цели на  $4T_{\Phi}$  с каждого конца серии измерений.

### Некоторые результаты моделирования

На рис. 4, а-е представлены результаты предварительной обработки результатов измерений. Для всех графиков, приведенных на рисунке, на горизонтальной оси отмечены номера измерений пленга, а на вертикальной оси указаны значения пленга в радианах. Условия измерения одинаковые, случайная составляющая погрешности измерений имеет  $\sigma = 0,01$  рад, систематическая погрешность равна  $0,01$  рад.

Рис. 4, а соответствует алгоритму «Линейная аппроксимация», т. е. предварительной обработке с аппроксимацией линейной функцией, рис. 4, б – алгоритму «Квадратичная аппроксимация», т. е. предварительной обработке с аппроксимацией полиномом 2-го порядка, рис. 4, в – алгоритму «Кубическая аппроксимация», т. е. предварительной обработке с аппроксимацией линейным полиномом 3-го порядка, рис. 4, г – алгоритму «Усреднение на скользящем интервале» с длительностью интервала усреднения  $N_{\Phi} = 21$ , рис. 4, д – алгоритму «Нелинейный фильтр 2-го порядка» с постоянной фильтра  $N_{\Phi} = 10$ , рис. 4, е – алгоритму «Нелинейный фильтр 4-го порядка» с постоянной фильтра  $N_{\Phi} = 10$ .

Сравнение приведенных графиков показывает, что для всего диапазона измерений от 1 до 100 наилучшее приближение к истинным значениям пленга дает алгоритм с квадратичной аппроксимацией, а на среднем участке измерений от 40 до 60 наилучшее приближение у последнего алгоритма.

Очевидно, что систематическая погрешность не затрагивается ни одним из алгоритмов обработки. Для дальнейших вычислений параметров движения цели в четырех последних алгоритмах нецелесообразно использовать все  $N$  измерений, необходимо исключить крайние зоны, как это рекомендовано ранее.

Вывод о целесообразности или предпочтительности одного из рассмотренных алгоритмов, включая первый алгоритм «Без фильтрации» сделать нельзя, так как дальнейшая процедура определения параметров движения с усреднением множества получаемых значений может служить мощным фильтром. При этом, чем больше число  $N$  измерений в каждой серии, тем большей точности можно ожидать. С другой стороны, чем меньше число измерений, участвующих в дальнейших вычислениях, тем меньше времени затрачивается на определение искоемых параметров.

Основным критерием выбора алгоритма обработки может служить точность определения параметров цели для заданной тактической ситуации (параметры носителя пеленгационного канала и цели-источника излучения), а также модель погрешностей пеленгатора.

Сравним рассмотренные алгоритмы на следующем примере.

Дистанция 60–70 км, курсовые углы  $K_{\alpha 1} = -10$  угл. град.;  $K_{\alpha 2} = 170$  угл. град.,  $K_{\alpha} = -45$  угл. град., скорость носителя  $V_{\alpha 1} = V_{\alpha 2} = 19$  м/с; скорость  $V_{\alpha} = 20$  м/с, число измерений в первой и второй серии 100 с интервалом 1с.

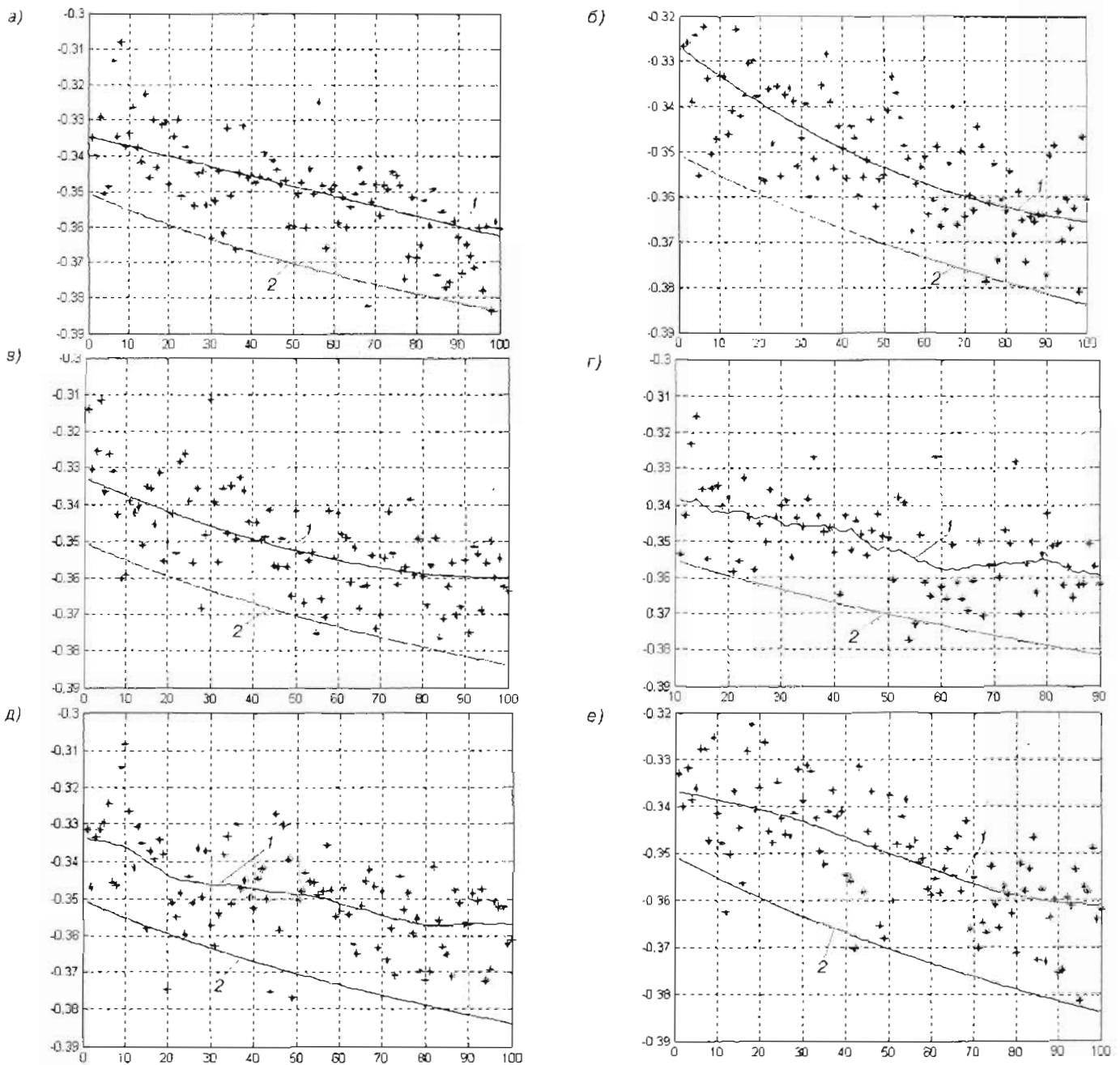
Положим все погрешности пеленгатора равными нулю. Это необходимо для оценки методической погрешности исследуемых алгоритмов.

Результаты вычислений сведены в табл. 1. Здесь для 5-го и 6-го алгоритмов принят интервал усреднения  $T_{\Phi} = 3$ , а для 7-го и 8-го алгоритмов –  $T_{\Phi} = 1$ . При таких значениях  $T_{\Phi}$  методические погрешности минимальные.

Из данных табл. 1 следует, что предпочтение следует отдать 1-му алгоритму. Близкие к нему результаты дают 7-й и 8-й алгоритмы с нелинейными фильтрами. Не пригоден алгоритм с линейной аппроксимацией первого и второго порядка. Попытка улучшить 5-й алгоритм усреднения путем исключения части вычисленных значений (6-й алгоритм) привела к увеличению методической погрешности.

В следующем примере сохраним исходные данные, но введем две составляющие ошибок измерения: центрированную случайную погрешность, распределенную по нормальному закону в интервале 1–200 со среднеквадратическим значением 0,1 угл. град. и постоянную систематическую погрешность 0,1 угл. град.

Результаты вычислений сведены в табл. 2. Здесь для 5-го алгоритма принят интервал усреднения  $T_{\Phi} = 21$  и для 8-го –  $T_{\Phi} = 7$ . При таких значениях  $T_{\Phi}$  погрешности измерения параметров для описанной ситуации близки к минимальным.



■ **Рис. 4.** Результаты предварительной обработки результатов измерений различными алгоритмами аппроксимации: а – линейная; б – квадратичная; в – кубическая; г – усреднение на скользящем интервале; д – нелинейный фильтр 2-го порядка; е – нелинейный фильтр 4-го порядка; \* – измеренные значения пеленга; 1 – значения пеленга, принимаемые для определения параметров движения цели; 2 – истинные значения пеленга

■ **Таблица 1**

Алгоритм	1	2	3	4	5	6	7	8
Дистанция, %	$10^{-12}$	>20,0	>20,0	10,5	0,14	2,3	0,005	0,003
Курс, %	$10^{-12}$	>20,0	>20,0	4,5	0,21	4,1	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$
Скорость, %	$10^{-12}$	>20,0	>20,0	14,0	0,33	5,4	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$

■ Таблица 2

Алгоритм	1	4	5	8
Дистанция, %	>50	5,1	31,6	3,0
Курс, %	>50	4,5	15	2,7
Скорость, %	>50	42,3	30,2	18,0

В этом случае предпочтение следует отдать 8-му алгоритму

### Заключение

Настоящая статья не претендует на завершённое исследование задачи оценки точности определения параметров подвижного источника излучения одним подвижным пеленгатором. Существует значительное число фильтров и способов обработки данных, позволяющих повысить точность измерений, которые не вошли в рассмотренный программный продукт. Однако при заинтересованности потребителя эти исследования могут быть продолжены и программа дополнена соответствующими блоками.

Естественно, что точность каждого из рассмотренных методов в значительной мере определяется параметрами используемых фильтров. Эти параметры можно выбирать оптимальными в зависимости от характеристик ошибок пеленгатора и тактической ситуации (взаимное расположение и движение источника излучения и пеленгатора). При известной модели ошибок пеленгации оптимальные алгоритмы и параметры фильтров можно найти при помощи предложенной программы, например, методом перебора.

Программу можно усовершенствовать, если автоматизировать процесс поиска оптимальных параметров, введя дополнительный цикл перебора искомого параметра и фиксации его значения при минимальной ошибке оцениваемой дистанции, скорости или курса наблюдаемого объекта, а также применительно к конкретной тактической ситуации.

Эта (или подобная) программа может быть использована в экспертных системах оценки возможности или эффективности целеуказания или стрельбы ракетным оружием, опознания судна-нарушителя территориальных вод или заповедных районов.

Приведенные в данной программе алгоритмы могут быть дополнены третьей пространственной координатой, что позволит использовать ее применительно к воздушным источникам излучений и воздушным носителям пеленгатора в качестве источника целеуказания.

### Литература

1. Никольцев В. А., Коржавин Г. А., Подоплекин Ю. Ф. и др. Основные тенденции развития систем управления РО ВМФ на современном этапе // Тр. 4-й Всероссийской НПК «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Сб. ВМФ России. – СПб.: ФГУП «НПО Специальных материалов», 2001. – С. 57–60.
2. Петров В. А., Подоплекин Ю. Ф., Тарасов В. П. и др. Концепция ЦНИИ «Гранит» по решению проблемы целеуказания РО ВМФ // Тр. 4-й Всероссийской НПК «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Сб. ВМФ России. – СПб.: ФГУП «НПО Специальных материалов», 2001. – С. 105–107.
3. Шаров С. Н. Основы проектирования информационно-измерительных приборов систем управления движущимися объектами. – СПб.: БГТУ, 1998. – 174 с.
4. Шаров С. Н. Исследование некоторых признаков ориентации движущегося объекта по береговой черте // Изв. вузов. Приборостроение. – Вып. 7–8. – 1994. – С. 32–39.