

# ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОМЕТЕОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ. III. ОПТИМАЛЬНЫЕ МАШИННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОНАБЛЮДЕНИЯ ДРЕЙФОВ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

*В. А. Нечитайленко*

Харьков

В работе [1] дан анализ проблемы оптимизации обработки радиометеорной информации на всех трех этапах. Показано также, что машинные алгоритмы, как правило, являются значительно более эффективными. Под машинным алгоритмом мы понимаем алгоритм, реализуемый программно либо аппаратурно в виде оптимального решающего устройства. В работе [2] анализируется задача оптимизации и автоматизации первичной обработки космогонической информации.

В настоящей работе рассматривается задача первичной обработки результатов радиолокационных измерений дрейфа. Хотя при этом поток, получаемой на РЛС информации, оказывается меньшим, задача вывода его на промежуточный носитель непосредственно после первичной обработки оказывается достаточно сложной. Поэтому одним из решений может быть решение, предложенное в работе [2] — использование управляющей ЭВМ для

решения задач первичной и вторичной обработок. Для стационарного измерительного комплекса, имеющего в своем составе ЭВМ, это решение следует считать, по-видимому, наиболее целесообразным, поскольку изготовление и отладка устройств сопряжения сводится в этом случае к минимуму.

В связи с постановкой задачи о расширении сети наблюдательных пунктов для изучения ветра и вытекающей отсюда задачи создания недорогих малогабаритных метеорных РЛС рассмотрим еще один способ разделения обработки во времени. Предварительно проанализируем различные способы измерения доплеровского смещения частоты применительно к когерентно-импульсной РЛС с большой скважностью.

### III—1. Способы измерения доплеровских сдвигов частоты

Известно, что доплеровское смещение частоты в большинстве метеорных РЛС измеряется методом биений. В работах [3, 4] показано, что этот метод характеризуется очень высокой селективностью к регистрируемым скоростям дрейфов в первую очередь вследствие того, что средняя длительность регистрируемых отражений оказывается одного порядка, а для многих рядов измерений меньшей, чем период доплеровской частоты. Применение умножения доплеровской частоты [5] и метода «секторных» измерений [6] позволяет заметно уменьшить селективность, однако не решает проблемы.

Перечисленные выше варианты первичной обработки не дают возможности учесть искажения за счет турбулентности в варианте машинной реализации этих алгоритмов их трансплантацией.

Предварительный эвристический анализ проблемы автоматизации первичной обработки дрейфа показывает, что в качестве алгоритмов машинной обработки нецелесообразно использование упомянутых выше алгоритмов в первую очередь в силу их селективности и недостаточной информативности. Первичная обработка методом биений и «секторным» методом дает некоторую интегральную оценку радиальной составляющей дрейфа, не учитывающую, в частности, эффект выборки.

Именно этим объясняются большие погрешности устройства «Дрейф-Э» [7, 8]. Эта работа представляет значительный интерес как первая попытка реализации ветрового автомата, однако практическая ценность ее невысока, так как авторы руководствовались неправильными концепциями: не учитывали при выборе алгоритма специфики автоматического устройства, что привело к значительным потерям информации.

Первичная обработка, обеспечивающая получение оценок функции  $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$ , дает в руки исследователя всю информацию, имеющуюся в сигнале, отраженном от движущегося метеорного

следа. В случае импульсной локации получение оценок  $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$  сводится к измерению фазовых сдвигов частот заполнения отраженных радиопульсов относительно опорной частоты. Известно, что возможности радиоизмерительной техники сегодняшнего дня позволяют вполне успешно решить эту задачу.

Если пренебречь влиянием эффекта выборки, интегральная оценка  $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$  сводится к оценке выборочного среднего. Подобный алгоритм первичной обработки реализован в радиолокационной аппаратуре непрерывного излучения [4].

### III—2. Алгоритм линейного приближения

В случае импульсной локации при измерении дрейфа в результате первичной обработки мы имеем совокупность дискретов  $\varphi_i$ , представляющих функцию  $\varphi(t)$ , получаемых измерением разностей фаз между высокочастотным заполнением импульсов, отраженных от метеорного следа, и опорным напряжением. Располагая набором этих значений, можно получить оптимальные оценки постоянной составляющей функции  $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$  и переменных составляющих в виде, например, отыскания коэффициентов полинома  $n$ -ой степени. Следует отметить, что непосредственное нахождение требуемой вычислительной процедуры оптимизацией по одному из критериев в техническом отношении оказывается довольно сложной задачей, поскольку функция  $\varphi(t)$  разрывна. Эта трудность может быть преодолена благодаря тому, что все наиболее вероятные значения величины  $\Delta \varphi_i = \varphi_{i+1} - \varphi_i$  при соотношениях сигнал/шум больше трех, не превышают порога  $\pi$ . Поэтому при переходе полного угла  $\varphi(t)$  через величину  $2\pi n$  в промежутке времени между двумя соседними дискретами функции  $\varphi(t)$  величина

$$|\Delta \varphi_i| > \pi. \quad (1)$$

При выполнении этого условия  $\varphi_{i+1}$  и все последующие дискреты должны быть исправлены на величину  $\pm 2\pi$  по правилу,

$$\text{если } \Delta \varphi_i > 0, \quad \varphi_{i+1}^* = \varphi_{i+1} - 2\pi;$$

$$\text{если } \Delta \varphi_i < 0, \quad \varphi_{i+1}^* = \varphi_{i+1} + 2\pi.$$

После такой коррекции оптимизацией значения производной на совокупности дискретов  $\varphi_i^*$  по методу наименьших квадратов получаем следующий квазиоптимальный алгоритм для оценки математического ожидания производной фазы:

$$\Delta \varphi = \frac{\sum_i \varphi_i^* i - \sum_i \varphi_i^* \sum_i i}{\sum_i i^2 - \left(\sum_i i\right)^2}. \quad (2)$$

Реализация этого алгоритма при использовании управляющей ЭВМ для первичной и вторичной обработок является тривиальной. В то же время при необходимости разделения первичной и вторичной обработок (отсутствие УЭВМ) алгоритм (2) трудно реализуем, так как для его реализации необходимо арифметическое устройство и память. В то же время вывод на промежуточный носитель совокупности  $\varphi_i^*$  достаточно сложная задача, так как требуемая скорость вывода составляет свыше 2000 бит/сек,

Задача, таким образом, заключается в отыскании алгоритма первичной обработки существенно более простого, чем (2), и сокращающего объем выводимой информации до 50—100 бит/сек, что позволяет использовать обычные выводные устройства типа МП-16, ПЛ-80 и др.

Квазиоптимальным алгоритмом, удовлетворяющим этим требованиям и обеспечивающим получение асимптотически несмещенных оценок  $\Delta\varphi$ , является алгоритм линейного приближения (АЛП):

$$\Delta\varphi = \frac{\sum_{i=0}^N (\varphi_{i+1}^* - \varphi_i^*)}{N-1}. \quad (3)$$

АЛП может быть реализован в виде довольно простого вычислительного устройства, содержащего до пяти регистров памяти, разрядность которых определяется точностью измерения  $\varphi_i$ , и простейший одноразрядный сумматор.

Статистика регистрируемых радиометеоров и быстроедействие упомянутых выше выводных устройств позволяют получить вместо одной оценки  $\Delta\varphi$  группу оценок по выборкам меньшего объема, что может быть использовано на этапе вторичной обработки для существенного уменьшения влияния эффекта выборки и искажений вследствие турбулентности и диффузии.

Точность, обеспечиваемая алгоритмом линейного приближения, оценена вероятностным моделированием на ЦВМ фазо-временной зависимости (ФВЗ) отраженных от движущегося метеорного следа радиосигналов. Модель ФВЗ имеет следующие параметры: Распределение амплитуд подчиняется обратно-степенному закону:

$$w(S) = 0,76S^{-1,76}.$$

Шумовое смещение фазы радиоимпульса подчиняется нормальному закону с дисперсией

$$\sigma_{\varphi}^2 \cong \frac{1}{S^2},$$

где

$$S = U_c / U_{ш. \text{эф.}}$$

В модели рассматривались функции  $\varphi(t)$ , представленные полиномом первой степени, характер отражений — ненасыщенные.

Порог ограничителя в тракте ПЧ  $S_{\text{пор}} = 5$ . Нижний порог  $S_{\text{min}}$  изменялся от 1 до 3. Обнаружитель типа 4/4/7-ИР [10] с  $S_{\text{пор}} = 3 \div 4$ .

На рис. 1 приведена зависимость среднеквадратичной погрешности определения  $\delta\Delta\varphi$  в функции  $S$ . При этом, как известно,

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi T_0} \Delta\varphi.$$

При машинной реализации АЛП фиксация числа реализаций соотношения (1) является рандомизированной мерой точности измерения  $\Delta\varphi$ . Зависимость соответствующего числа от  $S$  имеет вид (рис. 2). Учитывая характер алгоритмов вторичной обработки [12] при анализе состоятельности оценок  $\Delta\varphi$  и  $V_r$ , необходимо в первую очередь учитывать абсолютную погрешность измерения, так как погрешность определения средних радиальных составляющих ветра определяется абсолютной погрешностью измерения  $\Delta\varphi$ . В приложении 1 приведены алгоритмы (2) и (3) в записи на языке Фортран-4.

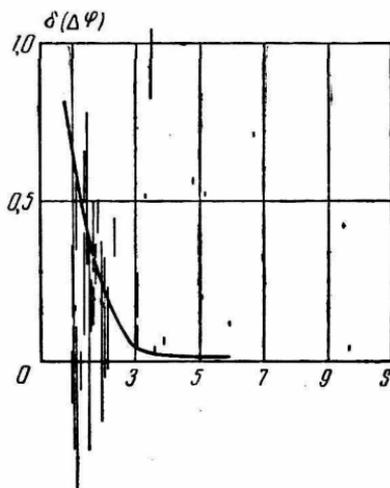


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности вычисления от соотношения сигнал/шум (вертикальные линии соединяют заданные в модели и вычисленные значения  $\Delta\varphi$  в условном масштабе).

### III—3. Алгоритм корреляционного анализа

При наличии в составе системы машинной обработки данных УЭВМ для получения оценок  $\Delta\varphi$  и переменных составляющих функции  $\varphi(t)$  могут быть использованы квазиоптимальные соотношения типа (2). Поскольку на характер функции  $\varphi(t)$  влияет ряд источников возмущения (дифракция, диффузия, многоцентровость отражения и т. д.), в качестве характеристик  $\varphi(t)$  целесообразно рассматривать наиболее характерные экстремумы автокорреляционной функции  $R(t)$ . Оценка  $R(t)$  может быть получена по дискретам  $\varphi_i$  известными в математической статистике методами. Очевидно,  $t$  — координата  $R(t)$  ( $t \neq 0$ ), соответствующая главному экстремуму функции  $R(t)$ , может быть интерпретирована как оценка периода доплеровской частоты ( $T_d$ ), поскольку при дискретном представлении  $\varphi(t)$  необходимо выделить  $T_d$  на множестве дискретов  $R_i$ ,  $T_d \cong T_0 i_d$ . Простейший алгоритм корреляционного анализа (АЛКА) для получения оценки  $T_d$  заключается в определении позиции  $i_d$ , на которой  $R(i) = \max$  (Приложение 1). В случае, когда на

множестве дискретов  $R(i)$  отсутствует экстремум с  $i \neq 0$ , необходима операция, эквивалентная умножению доплеровской частоты: все  $\varphi_i$  умножаются на  $n$ , причем после умножения

$$\varphi_i^* = n\varphi_i - 2k\pi, \quad 0 \leq \varphi_i^* < 2\pi,$$

где  $k$  — целое число 1, 2, ...

Нетрудно видеть, что эта операция автоматически выполняется при вычислениях на машине с фиксированной запятой, если  $\varphi_i$  представлено в масштабе  $1/2\pi$ . Ограничения, накладываемые при этом на коэффициент умножения, существенно менее жесткие, чем при умножении непосредственно в тракте приемного устройства, так как эта операция не вносит дополнительных погрешностей.

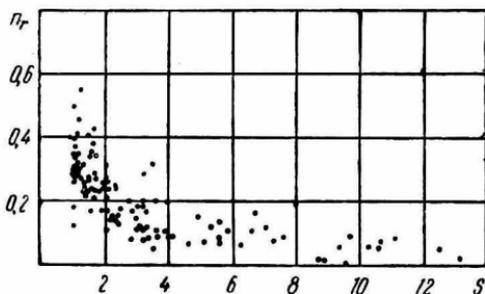


Рис. 2. Характер зависимости рандомизированной меры точности  $n_r$  соотношения сигнал/шум.

Преимуществом корреляционного анализа  $\varphi(t)$  является то, что даже при реализации простейшего алгоритма обнаружения

$T_d$  (АЛКА) стандартная ошибка не превышает  $\frac{T_0}{2\sqrt{2}}$  в области

$S \geq 3$ . В случае же усреднения по нескольким экстремумам либо вычисления  $T_d$  интерполяционными методами эта погрешность может быть доведена до величины меньшей, чем погрешность преобразователя. Погрешность последнего (интегральная) меньше погрешности единичного измерения  $\varphi_i$ , вызываемой шумами приемного устройства и дискретизации в  $\sqrt{N-1}$  раз, где  $N$  — объем выборки  $\varphi_i$ .

### III—4. Сравнительный анализ алгоритмов

При выборе того или иного машинного алгоритма первичной обработки наиболее существенными являются требования получения возможно большей точности оценки параметров и информативности первичного материала, объема и стоимости дополнительного оборудования, надежности работы устройств. С этой точки зрения, по-видимому, целесообразно в ветровых автоматах при отсутствии УЭВМ реализовать алгоритм АЛП, обеспечивающий высокую информативность и точность оценки  $\Delta\varphi$  при сравнительной простоте реализации. При наличии УЭВМ в системе обработки наблюдательных данных обработку следует вести с использованием более информативных алгоритмов (опти-

мизация составляющих  $\varphi(t)$ , соответствующих наиболее характерным экстремумам выборочного спектра функции  $\varphi(t)$ .

Вариант реализации в системе первичной обработки алгоритмов, изоморфных используемым при визуальной обработке [7], следует считать неудачным, так как он сохраняет селективность аналоговых фоторегистраторов и имеет невысокую точность. Оценки точности, приведенные в [8], некорректны; эти оценки заимствованы из [13], где рассматривается существенно отличный случай непрерывной локации при выполнении условия  $T \gg T_d$ , где  $T$ -мерный интервал. При измерениях дрейфа метеорных следов это условие не выполняется. Кроме того, отождествление точек перехода через нуль ФВЗ с минимальным по амплитуде импульсом приводит к стандартной ошибке, такой же, как в работе [14], которая неправильно оценена величиной  $2T_0$ . При использовании интерполяционных методов эта ошибка для больших  $S$  уменьшается для малых это уменьшение часто труднодостижимо. Кроме того, не учтены дополнительные погрешности при умножении частот, которые при  $n > (3 \div 4)$  сводят практически на нет преимущества этого метода уменьшения селективности ветрового регистратора.

### Приложение 1

Ниже приведены АЛП, алгоритм (2) и АЛКА в записи на языке Фортран-4. Операторы прерывания START-1 и START-2 формируют в программе SUPERVISOR команды обращения (CALL) и обеспечивают синхронизацию поступления дискретов  $\varphi_i$  (переменная SHIFT). Необходимые пояснения приведены справа прописным шрифтом.

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| SUBROUTINE ALP  | алгоритм линейного приближения |
| START-1   |                                |
| DELTA = 0   |                                |
| R1 = SHIFT (1)  | $\varphi_1$                    |
| J = 1   |                                |
| 3 CONTINUE  |                                |
| PAUSE   |                                |
| START-2   |                                |
| IF (SHIFT (J)) GO TO 1                                    |                                |
| GO TO 2   |                                |
| 1 R2 = SHIFT(J)   | прием дискретов $\varphi_j$    |
| DFR = R2 - R1   |                                |
| IF (ABS (DER). LE. 0.5. AND. (DFR). LT. 0.) DFR = DFR + 1 |                                |
| IF (ABS (DFR). LE. 0.5. AND. (DER). GT. 0.) DFR = DFR - 1 |                                |
| R1 = R2   |                                |
| DELTA = DELTA + DFR (J)                                   | накопление $\Delta\varphi_j$   |
| 2 REAL N  |                                |
| DELTA = DELTA/(N-1.)                                      | результат $\Delta\varphi$      |
| PRINT 2, DELTA  |                                |
| 4 FORMAT 3X, F7.2)  |                                |
| RETURN  |                                |
| END   |                                |
| SUBROUTINE ALP2   | алгоритм (2)                   |
| START-1   |                                |
| J = 1   |                                |

```

I(1) = 1
QI(1) = 1
FS(1) = SHIFT
FI(1) = SHIFT
3 CONTINUE
  PAUSE
  START-2
  IF(SHIFT) GO TO 1
  GO TO 2
1 J = J + 1
  I(J) = J
  REAL 1
  QI(J) = I(J)**2.
  REM(J) = SHIFT
  GO TO 3
2 DO 4K = 2, J
  CALL RMOD(REM(J), REM(J - 1), SS)
  FS(J) = SS
4 FI(J) = FS(J)*I(J)
  CI = 0.
  CF = 0.
  CGI = 0.
  CFI = 0.
  DO 5L = 1, J
  CI = CI + I(J)
  CF = CF + FS(J)
  CGI = CGI + GI(J)
  CFI = CFI + FI(J)
5 DELTA = (CFI - CF*CI)/(CGI - CI**2.)
  PRINT 6, DELTA
6 FORMAT (3X, F7.2)
  RETURN
  END
SUBROUTINE RMOD (X, Y, Z)
11 DIFR = X - Y
  IF (ABS(DIFR) - 0.5) 12, 7, 7
7 IF(DIFR) 8, 8, 9
8 Z = X + 1.
  GO TO 10
9 Z = X - 1.
10 X = Z
  GO TO 11
12 Z = X
  RETURN
  END
SUBROUTINE ALCA
  START-1
  J = 1
  ANG(1) = SHIFT
3 CONTINUE
  PAUSE
  START-2
  IF(SHIFT) GO TO 1
  GO TO 2
1 J = J + 1
  ANG(J) = SHIFT
  GO TO 3
2 PHMAT = 0.
  DO 4K = 1, J

```

статистика

накопление

результат

коррекция дискретов

алгоритм корреляционного анализа

число дискретов  
накопление дискретов

```

4  RHMAT = PHMAT + ANG(K)
   REAL J
   QMAT=(PHMAT/J)**2.
   INTEGER J
13 K = 1
11 H(K) = 0.
   DO 6I = 1, J - K
6  R(K) = R(K) + ANG(I)*ANG(I + K)
   RIK = J - K
   R(K) = R(K)/RIK - QMAT
   LOGICAL C
   IF(R(K) - R(K - 1)) 7,7,8
7  IF(C) GO TO 14
   C = FALSE
   GO TO 5
8  C = TRUE
5  IF(M - K) 9,9,10
10 K = K + 1
   GO TO 11
9  DO 12 I = 1, J
   ANG(I) = ANG(I)*2.
   IF(ANG(I).GE.1.) ANG(I) = ANG(I) - 1.
12 CONTINUE
   GO TO 13
14 FK = K - 1.
   DOPER = PER*FK
   PRINT 15, DOPER
15 FORMAT (3X, F7.2)
   RETURN
   END

```

мат. ожидание фазы  
 дискреты функции корреляции  
 поиск экстремума  
 умножение частоты  
 PER — период  $T_0$ , результат

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Л. Кашеев, Ю. И. Волощук, А. А. Дьяков, В. А. Нечитайленко. Оптимальная обработка радиометеорной информации. 1. Постановка задачи. См. статью настоящего сборника.
2. А. А. Дьяков. Об одном аспекте проблемы автоматизации обработки данных радиолокационных исследований метеорных явлений. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
3. В. А. Нечитайленко. Вопросы теории оптимальных метеорных регистраторов. Автореф. канд. дисс. Харьков, 1970.
4. A. Spizzichino. Note Technique EST(RSR)47, 1969.
5. Б. Л. Кашеев, В. А. Палагин, Ю. И. Суворов, Н. Д. Верба. Вопросы определения ветра радиометеорным методом. «Вестник ХПИ, № 36(84) Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
6. В. В. Сидоров. Автореф. канд. дисс. Казань, 1963.
7. М. Ф. Лагутин, В. П. Онуфриев, О. А. Деняк, В. Н. Кузнецов, Т. П. Петручек. Автоматическое устройство измерения доплеровского сдвига частоты кратковременных сигналов. Сб. «Радиотехника», вып. 19. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
8. В. П. Онуфриев, М. Ф. Лагутин. Ошибки цифрового измерения частоты в доплеровских метеорных РЛС. Сб. «Радиотехника», вып. 19. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
9. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Методика определения оптимальных параметров АФС метеорных регистраторов. «Вестник ХПИ, № 36(84) Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
10. В. А. Нечитайленко. Оптимальные регистраторы метеорных РЛС. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.

11. Б. Л. К а щ е е в, В. Н. Л е б е д и н е ц, М. Ф. Л а г у т и н. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во «Наука», 1966.

12. В. А. Н е ч и т а й л е н к о. Исследование алгоритмов статистической обработки дрейфа метеорных следов. Тезисы доклада на XIII Пленуме ККМ. Изд-во «Наука», 1971.

13. Г. И. Т у з о в. Выделение и обработка информации в доплеровских системах. Изд-во «Советское радио», 1967.

14. И. А. Л ы с е н к о. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1962.