

ОШИБКИ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ В ДОППЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРНЫХ РЛС

В. П. Онуфриев, М. Ф. Лагутин

Харьков

Увеличение объема измерительной информации, получаемой в ходе исследования ветрового режима верхней атмосферы, усложнение этих экспериментов требуют привлечения самых разнообразных средств и способов для автоматизации измерительной аппаратуры и процесса обработки информации.

В статье анализируются инструментальные и шумовые ошибки автоматического измерения доплеровского сдвига частоты.

Измерение частоты состоит в преобразовании значения частоты в такой сигнал, который можно непосредственно подать в вычислительное или регистрирующее устройство.

При автоматическом измерении доплеровского сдвига частоты в когерентно-импульсной метеорной РЛС использован метод выделения огибающей импульсно-доплеровской записи с последующим формированием мерного интервала по переходам огибающей через нуль, разработанный и реализованный авторами [5].

Рассмотрим цифровые преобразователи, обратив внимание на ошибки преобразования. К преобразователям частота — цифровой код относятся частотомеры и периодомеры. Принцип построения их известен [1,2]. Остановимся на особенностях их применения в доплеровских системах [3]. Накопителем в данном случае служит счетчик импульсов.

Цифровые преобразователи характеризуются тем, что результат измерения последующими устройствами обработки может быть воспринят точно и ошибки измерителя частоты останутся основными.

Рассмотрим влияние шумов на ошибки измерения по схеме периодомера. Действие шумов приведет к флуктуации фазы принимаемых сигналов, что, в свою очередь, приведет к флуктуациям амплитуд импульсов на выходе фазового детектора. Если аппроксимировать участок синусоидальной огибающей импульсно-доплеровской записи вблизи перехода ее через нуль прямой линией, можно прийти к выводу, что шумовые флуктуации импульсов приведут к изменению мерного интервала T , следовательно, к ошибке в счете числа импульсов заполнения.

В импульсно-доплеровских когерентных РЛС выявление фазовых сдвигов происходит дискретно в момент воздействия отраженного импульса, поэтому частота Допплера

$$f_D = \frac{\varphi_i - \varphi_j}{2\pi T}, \quad (1)$$

где φ_i — фаза сигнала в момент прихода i -го импульса, соответствующего началу формирования мерного интервала T ;

φ_j — фаза сигнала в момент прихода j -го импульса, соответствующего концу мерного интервала.

Среднеквадратичную ошибку измерения частоты можно найти из выражения (1)

$$\sigma(f_D) = \frac{\sigma(\varphi_i - \varphi_j)}{2\pi T}. \quad (2)$$

Если полагать случайный процесс на входе измерителя частоты стационарным, то

$$\sigma(\varphi_i) = \sigma(\varphi_j) = \sigma(\varphi).$$

Величина мерного интервала выбирается значительно большей интервала корреляции случайного процесса на входе схемы, поэтому справедливо равенство

$$\sigma(\varphi_i - \varphi_j) = \sqrt{2} \sigma(\varphi). \tag{3}$$

Можно показать, что $\sigma(\varphi)$ обратно пропорциональна параметру обнаружения q , т. е. отношению максимального значения сигнала к эффективному значению помехи. Для импульсов колокольной формы [9]

$$\sigma(\varphi) = \frac{\sqrt{2\pi}}{q} = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\frac{2E}{N_0}}}, \tag{4}$$

где E — энергия сигнала;

N_0 — спектральная плотность шума.

Определяем среднеквадратичную ошибку измерения частоты за счет шумов, используя формулы (2, 3, 4):

$$\sigma(f_D)_{ш} = \frac{\sqrt{2} \sigma(\varphi)}{2\pi T} = \frac{1}{\sqrt{\pi n T} q}. \tag{5}$$

Таким образом, погрешность измерения частоты оказывается обратно пропорциональной отношению сигнала к шуму и величине мерного интервала T . Последнее объясняется тем, что в данной схеме измеряется средняя частота, и следовательно, чем больше время усреднения, тем больше сглаживаются случайные ошибки.

Если учитывать, что основная статистика метеорных отражений относится к следам недоуплотненного типа [4], значения T ограничены временем существования метеорного следа.

Используя формулу (5), найдем относительную среднеквадратичную ошибку

$$\frac{\sigma(f_D)_{ш}}{f_D} = \frac{1}{\sqrt{\pi n q}}. \tag{6}$$

Шумовые ошибки измерения частоты повлекут за собой ошибки в измерении радиальной составляющей скорости дрейфа ионизированного следа. Последняя определяется простым выражением [4]

$$V_p = \frac{\lambda}{2} f_D, \tag{7}$$

где λ — длина волны радиопередатчика.

Значение относительной среднеквадратичной ошибки найдем из формулы (7)

$$\frac{\sigma(V_p)}{V_p} = \frac{\sigma(f_D)}{f_D}. \tag{8}$$

На рисунке показаны значения относительных среднеквадратичных шумовых ошибок измерения радиальной составляющей скорости дрейфа метеорного следа как функция отношения сигнала к шуму и коэффициента усреднения n .

Приведенные графики наглядно показывают, что при увеличении n ошибка уменьшается пропорционально. Графики с достаточной точностью определяют относительную среднеквадратичную ошибку измерения скорости дрейфа при заданном параметре обнаружения.

Данный вывод позволяет применить умножение частоты [6] для расширения инструментальных возможностей измерения доплеровского сдвига частоты. С увеличением коэффициента умножения $m = n$ вероят-

ность правильной обработки возрастает пропорционально. Однако это дает выигрыш только при методе выделения огибающей и при радиолокации метеорных следов недоуплотненного и переходного типа, когда период Допплера оказывается меньше времени существования следа, так как при увеличении m уменьшается q .

Определим ошибку измерения периода доплеровского сдвига частоты T_d при применении в качестве выходного устройства счетчика импульсов. Считая, что ошибка из-за дискретности отсчета имеет равномерное распределение, получим [7]

$$\sigma(T_d)_{\text{сн}} = \frac{T_{\text{эт}}}{2\sqrt{3}}, \quad (9)$$

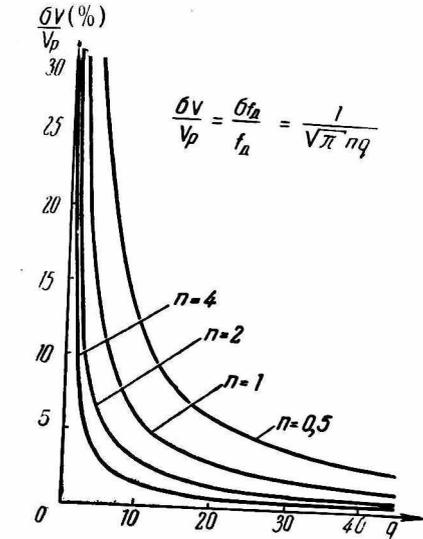
где $T_{\text{эт}}$ — период следования счетных импульсов.

При использовании принципа нониусного отсчета эта ошибка уменьшится на порядок.

Относительная среднеквадратичная ошибка измерения периода Допплера

$$\frac{\sigma(T_d)_{\text{сн}}}{T_d} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{T_{\text{эт}}}{T_d}. \quad (10)$$

Определим результирующую относительную среднеквадратичную ошибку измерения частоты (радиальной скорости), считая шумовые ошибки (6) и ошибки за счет дискретности счета (10) независимыми:



Зависимость относительной среднеквадратичной ошибки измерения частоты (скорости) от отношения сигнал/шум.

$$\frac{\sigma(f_d)}{f_d} = \frac{\sigma(V_p)}{V_p} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(f_d)_{\text{ш}}}{f_d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(T_d)_{\text{сн}}}{T_d}\right)^2}. \quad (11)$$

При визуальном методе съема радиометеорной информации, применяемом в настоящее время, основная ошибка измерения — ошибка интерполяции перехода огибающей импульсно-доплеровской записи через нуль.

При использовании механической шкалы среднеквадратичная ошибка отсчета приближенно может быть определена по формуле

$$\sigma(T_d)_{\text{нд}} \approx 0,15 \Delta l M,$$

где Δl — расстояние между соседними делениями шкалы;

M — масштаб шкалы по координате T_d .

При использовании электронной шкалы

$$\sigma(T_d)_{\text{нд}} \approx (0,05 \div 0,1) T_m,$$

где T_m — период следования электронных меток.

В работе [8] показано, что при визуальной обработке фазовременной регистрации доплеровского сдвига частоты когерентно-импульсной метеорной РЛС точность измерения T_d

$$\sigma(T_d) = 2T_n, \quad (12)$$

где T_n — период следования зондирующих импульсов РЛС.

Выбор минимальных значений T_n ограничен однозначностью определения наклонной дальности до лоцируемого следа и составляет в типовых метеорных РЛС $T_n = 2$ мсек, поэтому точность измерения получается низкой. В нашем случае $\sigma(T_n) = 4$ мсек.

Из сравнения выражений (9) и (12) видно преимущество цифровых выходных устройств, обеспечивающих значительно большую точность измерения при высокой оперативности и субъективности обработки радиометеорной информации.

В заключение необходимо отметить, что исследование проводилось в предположении линейного закона изменения измеряемой частоты, когда ионизированный след сформировался полностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. С. Полулях. Электронные измерительные приборы. Изд-во «Высшая школа», 1966.
2. Б. И. Швецкий. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. Изд-во «Техніка», Киев, 1964.
3. Г. И. Тузов. Выделение и обработка информации в доплеровских системах. Изд-во «Советское радио», 1967.
4. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во «Наука», 1966.
5. М. Ф. Лагутин, В. П. Онуфриев, О. А. Деняк, В. Н. Кузнецов, Т. П. Петручек. Автоматическое измерение доплеровского сдвига частоты в когерентно-импульсной РЛС. Тезисы докладов Украинского республиканского научно-технического семинара «Элементы и устройства радиолокационной техники». Одесса, октябрь, 1969.
6. М. Ф. Лагутин, В. П. Онуфриев, Т. П. Петручек. Результаты применения умножения частоты при измерении скорости дрейфа метеорного следа. Тезисы докладов 25-й Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио и Дню связиста, Москва, 1969.
7. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд-во «Наука», 1964.
8. И. А. Лысенко. Исследование движения воздушных масс верхней атмосферы методом радиолокации метеорных следов. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1962.
9. Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. Изд-во «Советское радио», 1963.