

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ
ИНФОРМАЦИИ О СКОРОСТИ ДРЕЙФА
МЕТЕОРНОГО СЛЕДА**

Решение проблемы автоматического измерения скорости дрейфа метеорного следа встречает значительные трудности, вызываемые высоким уровнем помех и ограниченным временем существования отражения. Это обуславливает необходимость применения специальных методов обработки информации с целью минимизации помех и оптимального выделения полезного сигнала.

Наиболее эффективна поэтапная обработка радиометеорной информации.

На первом этапе (первичная обработка) используется фазовый детектор с целью выделения доплеровского сдвига. Сигнал на выходе фазового детектора обладает двумя особенностями: 1) сигнал представляет собой сумму случайной помехи и полезной составляющей; 2) вид полезной составляющей сигнала априори известен и является гармонической функцией.

Указанные особенности позволяют в качестве оптимального метода обработки информации на втором этапе (вторичная обработка информации) применить метод наименьших квадратов [1], при помощи которого определяются оптимальные параметры x_0 , ω , φ полезного сигнала $f(t)$:

$$f(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

по экспериментально измеренным значениям $Y_i = Y(t_i)$ на выходе фазового детектора в моменты времени t_i $i = 1, 2, 3 \dots n$, где n — число замеров за время существования отраженного сигнала. В случае распределения помехи по нормальному закону выделенный полезный сигнал соответствует максимальной вероятности для конкретных значений Y_i , т. е. соответствует принципу максимального правдоподобия [2].

Оптимальные параметры полезного сигнала при использовании метода наименьших квадратов определяются из условия минимума суммы

$$S = \sum_{i=1}^n [Y_i - f(t_i)]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

системой уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial x_0} = \sum_{i=1}^n [Y_i - x_0 \sin(\omega t_i + \varphi)] \sin(\omega t_i + \varphi) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \omega} = \sum_{i=1}^n [Y_i - x_0 \sin(\omega t_i + \varphi)] x_0 t_i \cos(\omega t_i + \varphi) = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi} = \sum_{i=1}^n [Y_i - x_0 \sin(\omega t_i + \varphi)] x_0 \cos(\omega t_i + \varphi) = 0. \quad (5)$$

Уравнения (3), (4), (5) решались методом Ньютона с помощью ЭЦВМ М-222. Для решения преобразуем их к виду, удобному для вычислений:

$$\sum_{i=1}^n Y_i \sin(\omega t_i + \varphi) - x_0 \sum_{i=1}^n \sin^2(\omega t_i + \varphi) = 0; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i t_i \cos(\omega t_i + \varphi) - \frac{x_0}{2} \sum_{i=1}^n t_i \sin 2(\omega t_i + \varphi) = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i \cos(\omega t_i + \varphi) - \frac{x_0}{2} \sum_{i=1}^n \sin 2(\omega t_i + \varphi) = 0. \quad (8)$$

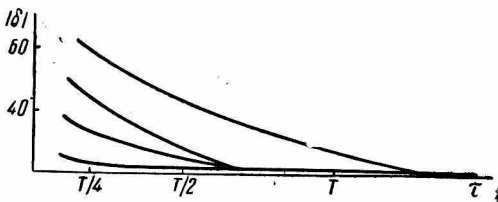


Рис. 1. Экспериментальные зависимости погрешностей наиболее характерных метеорных отражений в зависимости от приведенного времени.

Из уравнения (6) амплитуду x_0 выразим через ω и φ :

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \sin(\omega t_i + \varphi)}{\sin^2(\omega t_i + \varphi)}. \quad (9)$$

После подстановки (7) в (8) получим

$$\sigma(\omega, \varphi) = \sigma[x_0(\omega, \varphi), \omega, \varphi] = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n Y_i \sin(\omega t_i + \varphi) \right]^2}{\sum_{i=1}^n \sin^2(\omega t_i + \varphi)}. \quad (10)$$

В результате обработки 1000 реализаций вычислены оптимальные оценки выходного сигнала фазового детектора. Результаты для наиболее характерных отражений показаны на рис. 1. На основании обработки этих реализаций построены гистограммы $P(\xi)$ распределения случайных помех ξ на выходе фазового детектора. Оценка значений помехи ξ производилась по формуле

$$\xi_j(t_i) = Y_j(t_i) - x_j(t_i) \quad (11)$$

(j — номер исследуемой реализации отраженного сигнала).

Гистограммы $P(\xi)$, как видно из рис. 2, свидетельствуют о нормальном законе распределения помех ξ . Следовательно, использование метода наименьших квадратов для обработки радиометеорной информации позволяет получить наиболее вероятный критерий оценки полезного сигнала, удовлетворяющий принципу максимального правдоподобия.

Погрешности метода наименьших квадратов, как и других статистических методов, в большой степени зависят от количества обработанных экспериментальных данных. Количество

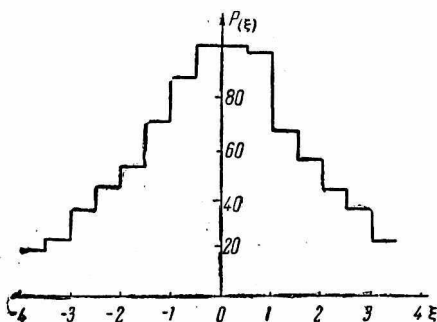


Рис. 2. Гистограмма распределения помех на выходе фазового детектора.

же экспериментальных точек при обработке радиометеорной информации во многом зависит от времени существования отраженного сигнала.

На практике значительное число отражений имеет весьма ограниченное время существования, что сильно затрудняет выделение полезного сигнала. В связи с этим, большое значение приобретает выявление зависимости погрешностей оценки

полезного сигнала в функции времени наблюдения.

На основании указанного массива экспериментальных отраженных сигналов вычислены зависимости относительной погрешности оценки радиальной составляющей скорости дрейфа метеорного следа в функции от приведенного времени наблюдения τ , измеряемой в долях периода T (T — период биений доплеровской частоты).

Величина относительной погрешности определялась по формуле

$$\delta(\tau) = \frac{\omega(\tau_{\max}) - \omega(\tau)}{\omega(\tau_{\max})} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где τ_{\max} — максимальное приведенное время существования отражения.

Введение времени τ и относительной ошибки (12) позволяет сопоставить результаты обработки полезного сигнала при различных значениях доплеровской частоты.

Экспериментальные зависимости $\delta(\tau)$, показанные на рис. 1, свидетельствуют о том, что при $\tau \approx 1 + 2$ значения погрешности лежат в пределах 2—10% и весьма медленно нарастают с уменьшением τ . Это позволяет сделать вывод, что при $\tau > 1 + 2$ погрешности практически постоянны, и использовать значения $\omega(\tau_{\max})$ при $\tau_{\max} \geq 1$ для вычисления относительной погрешности. Кривые возрастания погрешностей дают возможность

определить минимальное время существования отражения, необходимое для выделения полезного сигнала с заданной точностью. Как видно из рис. 1, для оценки радиальной составляющей скорости дрейфа с погрешностью не более 10 % могут быть использованы отражения, для которых время $\tau \geq T/4$.

Итак, использование метода наименьших квадратов для обработки радиометеорной информации на выходе фазового детектора позволяет с достаточной точностью выделить полезный сигнал при наличии интенсивных помех и относительно малом времени наблюдения отражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969. 560 с.
2. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров. М., «Наука», 1965. 778 с.