УДК 621.39

ЦИФРОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ МЕТЕОРОВ, ВТОРГАЮЩИХСЯ В ВЕРХНИЕ СЛОИ АТМОСФЕРЫ

А.А. Головин, В.И. Слюсар

Предлагается новый цифровой метод измерения геоцентрических скоростей метеоров, основанный на оценивании периода повторения перекрывающихся во времени импульсных эхо-сигналов, полученных по серии зондирований. При этом используется информация о законе изменения огибающей импульсов. Сама измерительная выборка формируется путем многократного отбора одноименных отсчетов сигналов, полученных в разных периодах излучения. В случае аналитической функции огибающей искомая оценка скорости определяется решением системы алгебраических уравнений или уравнения М-ой степени (М-количество сигнальных отсчетов, формируемых в пределах существования сигнальной смеси). При неаналитической форме сигналов используются итерационные методы оценивания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аналого-цифровое преобразование, квадратурные составляющие сигнала, отсчеты сигнала, метод наименьших квадратов, нормированная комплексная огибающая импульса, модифицированная функция правдоподобия.

Расширение областей применения и усложнение задач, решаемых радиолокационными комплексами, как сложными информационными системами, обусловили появление новых цифровых методов измерения скоростей малых тел Солнечной системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При начальном исследовании зададимся линейной моделью движения метеора в пределах интервала наблюдения. Предположим, что вектор скорости метеора лежит на линии "РЛС – метеор". Поскольку уменьшением скорости полета метеора в атмосфере Земли можно пренебречь, скорость метеора будем считать постоянной. Факторы влияющие на движение метеора, такие как его размер, форма, неоднородность среды, в которой совершается полет, учитывать не будем. Все дальнейшие выкладки ориентированы на обработку нескольких импульсных сигналов или их пачек. При этом предполагается, что указанные импульсы имеют одинаковую, описываемую аналитической функцией известную форму огибающей и на интервале приема сигнальной пачки приращение периода их повторения d остается неизменным. Будем также полагать, что уровень сигнала позволяет пренебречь наличием шумов и приемный тракт вносит пренебрежимо малые нелинейные искажения.

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ

Последовательность зондирующих импульсов представляет собой пачку из N+1 радиоимпульсов с произвольной, но известной огибающей, и периодом повторения T. Измерительную выборку будем формировать путем многократного отбора одноименных отсчетов сигналов, полученных в разные периоды излучения. Вариант расстановки во времени сигналов пакета, используемого для оценивания скорости представлен на рис. 1, где d - период повторения импульсов в сформированной измерительной выборке, z – смещение первого из задействованных для измерения отсчетов АЦП относительно фронта последнего импульса в пачке.

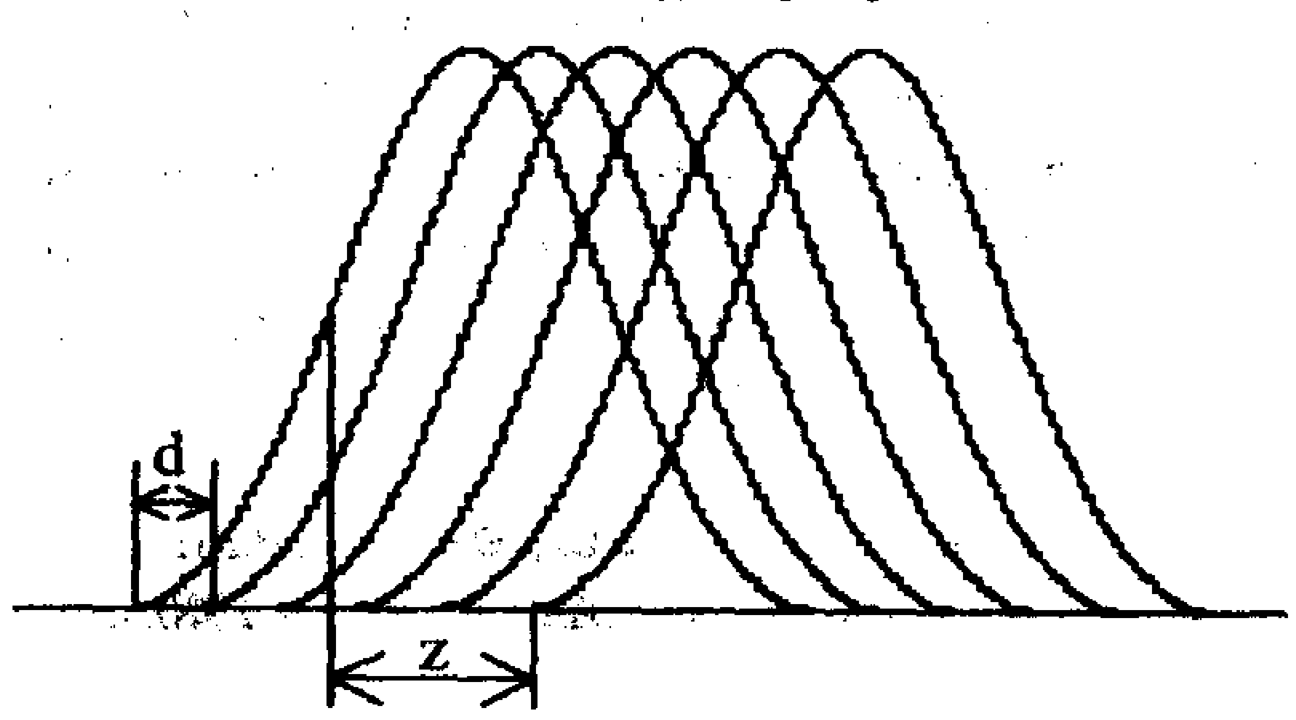

Рис. 1

Величина скорости метеора определяется по формуле:

$$V = \frac{d \cdot c}{2T}, \tag{1}$$

где c – скорость света.

В рамках предлагаемого подхода воспользуемся для определения оценок z и d методом наименьших квадратов [1]. Сумма квадратов невязок всех уравнений системы для квадратурных составляющих дискретной нормированной комплексной огибающей импульса $k(s+z-nd)$ будет иметь вид:

$$F=\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left\{U_{sn}^{c}-\widetilde{a}^{c}k^{c}(s+z-nd)\right\}^{2}+\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left\{U_{sn}^{s}-\widetilde{a}^{s}k^{s}(s+z-nd)\right\}^{2}, \qquad (2)$$

где $U_{sn}^{c(s)}$ - квадратурные составляющие напряжения n-го импульса в s-м отсчете АЦП;

$\widetilde{a}^{c(s)}$ - квадратурные составляющие амплитуды сигналов;

s – номер отсчета АЦП;

S – длительность импульсов в периодах дискретизации АЦП.

Минимум F обеспечивается при вполне определенных оценках $\widehat{a}^{c}$ и $\widehat{a}^{s}$. Эти оценки, найдем путем дифференцирования (2) по указанным неизвестным и приравниванием к нулю их частных производных. Проделав это, получим:

$$\widehat{a}^{c}=\frac{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{sn}^{c}k^{c}(s+\widehat{z}-n\widehat{d})}{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left[k^{c}(s+\widehat{z}-n\widehat{d})\right]^{2}};\qquad \widehat{a}^{s}=\frac{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{sn}^{s}k^{s}(s+\widehat{z}-n\widehat{d})}{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left[k^{s}(s+\widehat{z}-n\widehat{d})\right]^{2}}. \qquad (3)$$

Для нахождения оценок $\widehat{z}$ и $\widehat{d}$ перейдем к модифицированной, согласно [1], функции правдоподобия. Для этого возведем в квадрат слагаемые, входящие в (1), после чего получим:

$$\begin{aligned}F=&\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}(U_{sn}^{c})^{2}-2\widetilde{a}^{c}\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{sn}^{c}k^{c}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})+\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n-0}^{N-1}\left[\widetilde{a}^{c}k^{c}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}+\\&+\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}(U_{sn}^{s})^{2}-2\widetilde{a}^{c}\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{sn}^{s}k^{s}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})+\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n-0}^{N-1}\left[\widetilde{a}^{s}k^{s}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}\end{aligned} \qquad (4)$$

Минимизация F обеспечивается при максимальном значении слагаемых со знаком "минус" в выражении (4). Модифицированная функция правдоподобия с учетом полученных оценок (2) и (3) примет вид:

$$F_{m}=\frac{\left[\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{cn}^{c}k^{c}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}}{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left[k^{c}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}}+\frac{\left[\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}U_{cn}^{s}k^{s}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}}{\sum_{s=0}^{S-1}\sum_{n=0}^{N-1}\left[k^{s}(s+\widetilde{z}-n\widetilde{d})\right]^{2}}=\max. \qquad (5)$$

Искомые оценки $\widehat{z}$ и $\widehat{d}$ находим из (5) путем перебора с заданным шагом их возможных значений до достижения функцией F_m максимума максиморум. Данный метод является дальнейшим развитием предложенного в [2] подхода и позволяет использовать сигналы любой известной формы.

ВЫВОДЫ

Результаты проверки рассмотренной измерительной процедуры в пакете MathCad подтвердили ее работоспособность и возможность определения величин d, в 100 - 1000 раз меньших периода дискретизации при принятых ограничениях. В целом, предложенный способ измерения позволяет устранить недостатки традиционных процедур измерения геоцентрических скоростей метеоров, основанных на анализе частоты Доплера отраженного сигнала. В частности, речь идет о снятии ограничений на когерентность сигналов, время накопления измерительной выборки, пределы однозначного измерения скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варюхин В.А., Покровский В.И., Сахно В.Ф. Модифицированная функция правдоподобия в задаче определения угловых координат источников с помощью антенной решетки //Доклады АН СССР. - 1983.- Т. 270.- N 5. - С. 1092-1094.

2. Слюсар В.И. Измерение периода повторения перекрывающихся во времени импульсов //Радиоэлектроника. – 2000. – № 5. – С. 27 – 33. (Изв. высш. учеб. заведений).