

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЕТЕОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

М. Ф. Лагутин, Д. М. Смагин

Харьков

Метеорная частица, сгорая в атмосфере Земли, оставляет после себя ионизированный след, который является эффективным рефлектором радиоволн. Отраженная энергия зависит от параметров атмосферы и следа. Главными из них будут: распределение плотности ионизации вдоль и по радиусу следа, его ориентация и перемещение, длина и поляризация падающей волны, коэффициент диффузии. Отражающие свойства следов зависят от электронной плотности, которая определяется массой метеорной частицы. Следы с пониженной электронной плотностью ($10^{10} \div 10^{11}$ эл/м), соответствующие слабым метеорам, имеют настолько низкую электронную концентрацию, что падающая волна проходит сквозь них. Каждый возбужденный электрон можно рассматривать как независимый переизлучатель падающей волны. Фаза сигналов, отраженных от различных участков следа, изменяется по закону

$$\varphi = 2\pi ft - \frac{4\pi}{\lambda} R, \quad (1)$$

где f , λ — рабочая частота и длина волны передатчика;

R — расстояние до отраженной точки.

Результирующая мгновенная амплитуда отраженного сигнала выражается зависимостью

$$\begin{aligned} A &= F_r \int_{-\infty}^{+\infty} \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{\lambda} R_0 - \frac{\pi}{2} x^2\right) dx = \\ &= F_r \left[C \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{\lambda} R_0\right) - S \cos\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{\lambda} R_0\right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где F_r — напряженность поля;

C и S — интегралы Френеля;

R_0 — кратчайшее расстояние из точки наблюдения до следа;

x — величина, пропорциональная расстоянию вдоль следа.

Выражение (2) можно рассматривать как результат наложения двух волн, имеющих разность фаз $\frac{\pi}{2}$ и амплитуды C и S . Ортогональное изображение интегралов C и S создает двойную спираль с последовательно уменьшающимися в обе стороны витками (спираль Корню).

Перемещению метеорной частицы вдоль следа соответствует изменение вектора отраженного сигнала по спирали Корню, начало которого помещено в точку $(-\infty)$. При этом изменение мощности отраженного сигнала происходит согласно выражению

$$P_r = F_r^2 (C^2 + S^2). \quad (3)$$

Мощность отраженного сигнала, определяемая уравнением (3), непрерывно увеличивается при движении метеора до точки зеркального отражения (R_0 ; t_0), после прохождения которой имеют место колебания сигнала с уменьшающейся амплитудой и увеличивающейся частотой, вызванные дифракционными явлениями. Такое изменение амплитуды наблюдается при импульсном методе радиолокации метеорных следов.

При использовании непрерывно-волнового метода следует учесть, что некоторая доля излучаемой мощности попадает в приемник за счет прямой волны. Между отраженным и непосредственно приходящим сигналом прямой волны происходят биения, показывающие дифракционные колебания с возрастающей амплитудой и убывающей частотой до точки t_0 . При этом интенсивность сигнала изменяется согласно уравнению

$$P_{r+d} = \frac{F_r^2}{\pi^2 x^2} + F_d^2 + \frac{2F_r \cdot F_d}{\pi x} \sin\left(\frac{\pi}{2} x^2 + \psi\right), \quad (4)$$

а после t_0

$$P_{r+d} = F_d^2 + 2F_r^2 + \frac{F_r^2}{\pi^2 x^2} - 2\sqrt{2} F_r F_d \sin\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{2F_r}{\pi x} \left\{ F_d^2 + 2F_r^2 - 2\sqrt{2} F_r F_d \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \sin\left[\frac{\pi}{2} x^2 - \arctg \frac{F_r - F_d \sin \psi}{F_r + F_d \cos \psi}\right] \right\}, \quad (5)$$

где F_d^2 — уровень мощности прямой волны;

$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}(2R_0 - d)$ — разность фаз между прямой и отраженной волнами в момент времени t_0 ;

d — расстояние между передатчиком и приемником.

Колебательные члены уравнений (3), (4), (5) представляют интерес главным образом с точки зрения измерения скоростей. Однако при этом необходимо учитывать, что за время формирования след может перемещаться под действием турбулентных ветров, а также расширяться в результате амбиполярной диффузии. К моменту времени t значение радиуса следа определяется выражением

$$r = \sqrt{r_0^2 + 4Dt}, \quad (6)$$

где D — коэффициент диффузии,

r_0 — начальный радиус.

Коэффициент диффузии может изменяться от $1 \text{ м}^2/\text{сек}$ на высоте 80 км до $140 \text{ м}^2/\text{сек}$ на высоте 120 км [2].

Из-за начального радиуса и расширения следа в результате диффузии разность фаз между составляющими сигналов, отраженных от электронов (расположенных по радиусу следа), уменьшает отраженную мощность. Уменьшение мощности определяется выражением

$$\frac{P_R(t)}{P_R(0)} = e^{-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2}} \frac{1 - e^{-\sqrt{2} \cdot \Delta}}{\sqrt{2} \Delta}, \quad (7)$$

где $P_R(t)$ — мощность отраженного сигнала от всех диффундирующих электронов;

$P_R(0)$ — мощность отраженного сигнала при условии, что все электроны следа переизлучают в фазе, где Δ связано с коэффициентом диффузии D следующим соотношением:

$$\Delta = \frac{8\pi^2 \sqrt{R}}{v\lambda^2} D. \quad (8)$$

В течение короткого времени (десятые доли секунды для метеора $+6^m$ видимой звездной величины) линейная плотность становится настолько ослабленной, что энергия отраженных сигналов оказывается соизмеримой с собственными шумами приемника.

Начальный радиус метеорного следа не оказывает существенного влияния на измерение скорости, а влияет лишь на интенсивность сигнала. Наличие диффузии приводит к заметным изменениям временного положения экстремумов дифракционных флуктуаций отраженного сигнала. Особенно это относится к максимумам и минимумам, близко расположенным к точке t_0 . Мак-Кинли [1] показал, что диффузия приводит к уменьшению эффективной длины следа. В применении к анализу спирали Корню это соответствует тому, что начало вектора, характеризующего величину сигнала, будет двигаться в том же направлении, что и метеор. Это приведет не только к изменению амплитуды, но и фазы отраженного сигнала, что вызовет заметное изменение положения первых максимумов дифракционной картины.

В работе [3] показано, что ошибки в определении скорости при наличии диффузии могут достигать до 12% при определении скорости по временному расстоянию от первого до третьего максимума и до 30% при определении по расстоянию от первого максимума до первого минимума. Приведенные ошибки получены при значении $\bar{\Delta} = 3$. Хотя погрешности в измерении скорости по зонам, лежащим далеко от точки

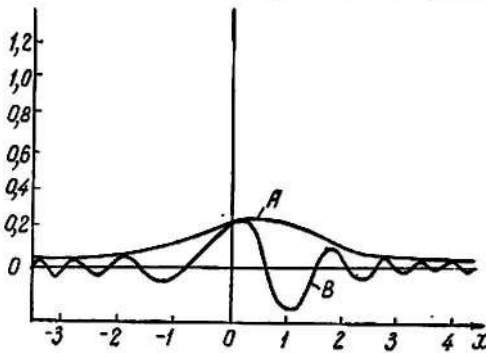


Рис. 1.

t^0 , значительно уменьшаются, так как их положение меньше изменяется (ошибка при определении скорости по расстоянию между вторым и третьим максимумами не превышает 2%), вести измерения по ним при большой диффузии невозможно, ибо при этом максимумы и минимумы выражены нечетко. Большие значения D приводят вообще к полному исчезновению дифракционных колебаний, оставляя только плавный подъем и спад уровня сигнала в районе точки t_0 . В этом случае производить измерение скорости некогерентным радиолокационным методом совершенно невозможно, так как колебания амплитуды полностью отсутствуют. Это отчетливо видно из рис. 1 (кривая A), на котором приведены расчетные амплитудно-временные зависимости дифракционных отражений от недоуплотненных следов [4].

Однако применение непрерывно-волнового метода позволяет обнаруживать вариации фазы как до, так и после точки t_0 (кривая B). Следовательно, в случае применения непрерывно-волнового метода можно получить большее количество регистраций, позволяющих производить измерения скорости. Более того, уменьшение эффективной длины следа в случае применения непрерывного излучения в меньшей степени сказывается на изменении фазы — при наблюдении сигналов «на подлете» перемещение начала вектора, характеризующего отраженный сигнал, происходит по виткам спирали с малыми диаметрами. Учитывая, что с увеличением чувствительности установки число метеоров, регистрируемых на больших высотах, увеличивается, а длина их следов сокращается, возможность получения дифракционных картин после точки t_0 значительно уменьшается, т. е. очевидно преимущество применения метода непрерывного излучения.

Влияние ветровых дрейфов следов на измерение скорости метеора трудно поддается анализу. Амплитудно-фазовая (векторная) диаграмма ме-

теорного отражения (рис. 2) показывает общее поведение отраженного сигнала и является типичной для метеорных отражений. Из диаграммы видны дифракционные колебания до точки зеркального отражения a и после этой точки b , а также амплитудно-фазовые изменения, вызванные ветровым перемещением следа d . Наличие значительных градиентов ветра может привести к повороту следа. Изменение ориентации следа может составлять 5 градусов за секунду. Градиент скорости турбулентного ветра в метеорной зоне доходит до 100 м/сек. Поворот и искривление метеорного следа, особенно первых основных зон, приводит к заметным ошибкам при определении скорости метеора и радианта.

В работе [6] приведены измерения градиента скорости турбулентного атмосферного ветра и дана количественная оценка его влияния на измерение скорости и радианта метеора. По данным этой работы, ошибки в измерении скорости могут достигать до 13,6 км/сек (при скорости метеора 40 км/сек) и радиантов до 19°. Измерения проводились обычной импульсной системой, возможности которой ограничены тем, что информация о скорости метеора получается после того, как метеор пройдет точку зеркального отражения, т. е. тогда, когда сформирован след большой протяженности и, следовательно, в большей степени подвержен влиянию ветров. Из амплитудно-фазовой диаграммы рис. 2 видно, что дифракционные колебания, полученные после точки t_0 , неполноценны для измерения скорости. Напротив, записи вполне удовлетворительны для анализа по определению скорости по дифракционным флуктуациям, имеющим место до этой точки.

Следует отметить, что импульсному методу, кроме недостатков методического характера, свойственны существенные аппаратные недостатки. Так, например, аппаратура непрерывного излучения с мощностью передатчика в 10 квт при полосе пропускания приемника 1000 гц позволяет наблюдать метеоры одного порядка звездной величины, что и импульсная система с мощностью в импульсе 1000 квт (средняя мощность 5–10 квт) при полосе пропускания приемника 100 кгц (длительность импульса 10 мксек, скважность 200). Однако реализация последней системы представляет более сложную задачу.

Применение непрерывного излучения создает ряд трудностей, связанных с присутствием прямой волны передатчика, удаленного от приемника на несколько километров. Для обеспечения качественных дифракционных флуктуаций (с большим коэффициентом глубины модуляции) необходимо, чтобы уровень прямого сигнала был соизмерим с уровнем отраженных сигналов. Уровень сигнала прямой волны можно поддерживать в требуемых пределах за счет ориентации передающей и приемной антенн с противофазным ослаблением части прямой волны. Однако такое ослабление нестабильно и не позволяет управлять величиной сигнала прямой волны. Для этой цели лучшим способом является полное подавление прямой волны за счет использования естественных экранов (гор, холмов и др.). При этом необходимо передавать прямой сигнал по специальному радиоканалу (канал опорного сигнала) и вводить ближе к оконченному каскаду при-

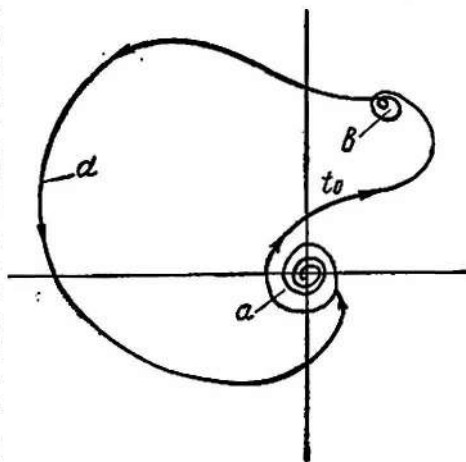


Рис. 2.

емника (к детектору). Это позволит регулировать в требуемых пределах уровень опорного сигнала.

В непрерывно-волновом методе положение максимумов и минимумов дифракционных картин отраженного сигнала обуславливается векторным сложением прямой и отраженных волн (4), (5). В зависимости от фазы вектора прямой волны размеры зон ∇ [8], содержащих n полных циклов амплитудно-временной зависимости, различны. Для зон, находящихся достаточно далеко от точки t_0 (витки спирали Корню близки к окружностям), фаза прямой волны мало влияет на их длину, поэтому малыми изменениями ∇ можно пренебречь. Однако этого делать нельзя для зон, близких к точке t_0 , которые наиболее подвержены изменениям от величины ψ , обусловленных увеличивающимися отклонениями витков спирали от окружности при приближении к t_0 . Размеры зон ∇ определяются выражением

$$\nabla_{nm} = x_n - x_m, \quad (9)$$

где x_n , x_m — величины, отсчитываемые по спирали Корню и содержащие n и m полных циклов.

x_n и x_m — определяются из соотношений

$$x_n = \sqrt{4n - \frac{2\psi}{\pi}}; \quad x_m = \sqrt{4m - \frac{2\psi}{\pi}} \quad (10)$$

Изменение ∇ приводит к изменению временного интервала между n^m и m^m циклами, согласно выражению

$$\Delta t_{mn} = \nabla_{mn} \frac{\sqrt{R_0 \lambda}}{2v} \left[\sqrt{4n - \frac{2\psi}{\pi}} - \sqrt{4m - \frac{2\psi}{\pi}} \right] \quad (11)$$

В случае когда $\psi \neq 0$, точки отсчета времени при определении Δt_{mn} будут смещены по отношению к случаю, когда $\psi = 0$, что приведет к изменению Δt_{mn} в сторону увеличения.

Скорость метеора с учетом ψ оценивается зависимостью

$$v = \frac{\sqrt{R_0 \lambda}}{\Delta t} \cdot \left[\sqrt{n - \frac{\psi}{2\pi}} - \sqrt{m - \frac{\psi}{2\pi}} \right] \quad (12)$$

(отсчет периодов ведется по точкам нулевого пересечения).

Следовательно, для точного определения скорости, согласно формуле (12), необходимо иметь сведения о величине угла ψ . Применение приближенной формулы

$$v = \frac{\sqrt{R_0 \lambda}}{\Delta t} \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{m}) \quad (13)$$

может привести к заметным систематическим ошибкам. Мейнстоун [8] показал, что ошибки могут доходить в отдельных случаях до 9% и в среднем до 5% при определении по девятому и четвертому циклам.

Ряд мер методического характера при анализе дифракционных картин метеорных записей позволяет снизить величину ошибок до 1% [9]. Необходимо, однако, отметить, что при отсутствии сведений о величине угла ψ ошибки для слабых метеоров будут значительно больше, так как последние создают дифракционные колебания, различные на уровне шумов в области, расположенной близко к точке t_0 .

Определить величину угла ψ из дифракционных картин можно многоканальным способом регистрации сигналов, в каждом из которых вводится сдвиг фаз опорного сигнала на заранее заданный угол. При этом [анализ

дифракционных картин отраженного сигнала значительно облегчается, так как запись одного и того же сигнала при разных фазах опорного сигнала позволяет (путем сравнения с теоретическими формами картин) определить ψ с большой точностью.

В случае непрерывного излучения измерение дальности до метеорного следа может быть произведено без дополнительных импульсных систем применением фазового метода [7]. Для этого необходимо излучать сигналы на двух частотах, незначительно отличающихся по величине (примерно на 0,03%). По разности фаз отраженных сигналов можно однозначно определить расстояние до отражающего объекта.

Наличие угла ψ , вызывающего дополнительные временные сдвиги (11) дифракционных картин, не позволяет производить вычисления радианта с необходимой точностью по временным положениям экстремумов, как это принято в случае импульсного метода. Отсюда возникает необходимость производить отсчет по точкам t_0 , временное положение которых необходимо определять с высокой точностью, что достигается применением амплитудно-фазовых регистраций подобно представленным на рис. 2. Для этого предлагается вводить кодированные метки времени, которые наносятся одновременно как на амплитудно-временные, так и на амплитудно-фазовые регистрации.

Известный метод разнесенного приема сигналов в трех пунктах для определения радиантов [11, 12] можно реализовать за счет применения трех передающих устройств и одной трехканальной приеморегистрирующей системы. В этом случае удастся избежать трудностей, связанных с ретрансляцией сигналов, а также обеспечить высокую стабильность работы приемного устройства.

С помощью аппаратуры, разработанной в Харьковском институте радиоэлектроники, аналогичной аппаратуре, описанной в работах [1, 10], в 1965—1966 гг. были проведены наблюдения метеоров методом непрерывного излучения.

Передатчик, излучающий немодулированные, стабилизированные кварцем колебания частотой 24 мгц, имел мощность 1,5 квт. Пятиэлементная антенна типа «волновой канал» располагалась на высоте 0,3λ от поверхности земли. Подобная же антенна использовалась на приемной установке, расположенной в черте Харькова на расстоянии 10 км от передатчика. Величина прямого сигнала ослаблялась ориентацией антенн. Однако многолучевое распространение прямой волны, переотражение от самолетов и др., вызывало значительные изменения как интенсивности, так и фазы прямой волны, что затрудняло наблюдения, которые порою становились совсем невозможными. Регистрация отражений производилась на фотоустановке с непрерывно движущейся пленкой со скоростью 0,3 см/сек. Примеры записей приведены на рис. 3. Из общего числа зарегистрированных отражений, используя метод непрерывного излучения, можно обработать 40—45% регистраций, по которым рассчитываются скорости метеоров. При импульсном методе аналогичный результат может быть получен для 5—10% регистраций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт применения радиотехнических средств для метеорных измерений показал, что импульсный метод, играющий до сих пор основную роль в определении астрономических параметров метеоров (скорость, радиант, орбита), основанный на анализе амплитудно-временных характеристик сигналов, отраженных от ионизированных следов метеоров, имеет большие погрешности, обусловленные следующим:

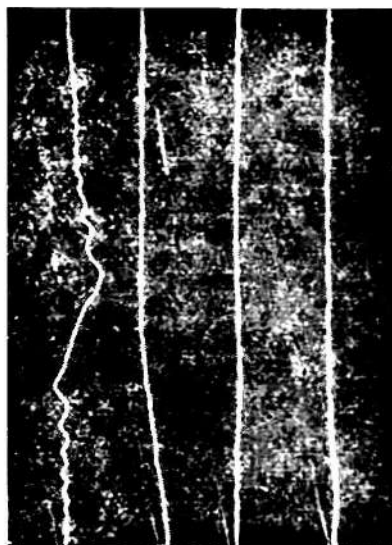


Рис. 3.

1) возможностью получения сведений об отраженном сигнале только после прохождения метеором точки зеркального отражения, т. е. тогда, когда сформированный след больше всего подвержен влиянию ветров;

2) погрешностями, вызванными неточным отсчетом временных интервалов. При этом влияние диффузии и других факторов приводит к тому, что значительная часть отражений не пригодна для анализа.

Непрерывно-волновой метод исследования в значительной мере лишен этих недостатков. Используя прямую волну либо ретранслированный сигнал в качестве опорного, можно получить сведения о метеоре из отраженного сигнала как до, так и после точки зеркального отражения (t_0 ; R_0). Причем, наиболее качественная часть дифракционной картины находится до точки t_0 . Кроме того, в случае непрерывного излучения возможно применение узкополосных высокочувствительных приемников, что существенно уменьшает влияние помех. Трудности же, связанные с неопределенностью величины угла ψ и положения точки t_0 , могут быть решены техническими средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. W. R. McKinley. Meteor velocities determined by radio observations. *Astrophys. J.*, vol. 113, 225—267, 1951.
2. T. R. Keiser. Radio echo studies of meteor ionization. *Advan. Phys.*, vol. 2, pp. 495—544, 1953.
3. Б. С. Дудник, Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец. «Помилки радіолокаційних вимірювань швидкості метеорів унаслідок дифузії». *Доповіди АН УРСР*, II, № 3, 299, 1961.
4. McKinley D. W. R. *Meteor Science and Engineering*, 1961.
5. Т. Р. Кайзер. Сб. «Метеоры». Изд-во иностр. лит., 1959.
6. В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин, И. А. Лысенко. Влияние атмосферного турбулентного ветра на измерение скоростей и радиантов метеоров. «Метеоры» № 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1960.
7. Н. П. Супряга. Радиолокация с непрерывным излучением. Воениздат, Мин. Обор. СССР, 1963.
8. J. S. Mainstone. The calculation of meteor velocities continuous-wave radio diffraction effects from trails, *Mon. Not. Royal. Astr. Soc.*, v. 120, № 6, 1960.
9. McKinley D. W. R. and Webb E. L. R. Reduction of meteor velocities from continuous-wave radio records. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, vol. 122, № 3, 1961.
10. L. A. Manning, O. G. Villard, A. M. Peterson, Radio Doppler investigation of meteoric heights and velocities. *J. Appl. Phys.*, vol. 20, 475—479 (1949).
11. J. G. Davies. Radio observations of meteors. *Advances Press. Inc.*, New York, vol. 9, p. 95—128. 1957.
12. J. C. Gill, J. G. Davies. A radio echo method of meteor orbit determination, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 116, 105—113, 1956.