

УДК 621.37.+551.553.5

Ф. И. Бушуев¹, Н. А. Калужный¹, А. П. Сливинский^{1,2}, А. В. Шульга¹

¹ Научно-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

² Український радіотехнічний інститут, Миколаїв

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ FM-СТАНЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ МЕТЕОРОВ

По сигнальной информации FM-передатчиков проведен анализ количества наблюдаемых сигналов, отраженных от метеоров, в зависимости от их времени жизни. Полученная статистика согласуется с ранее известными статистиками, что позволяет надеяться на возможность успешной селекции метеоров по сигналам FM-передатчиков. Разработана методика восстановления аналога амплитудно-временной характеристики (ABX) по спектру сигнала FM-радиостанции. Методика основана на использовании амплитудной модуляции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на метеорном следе, которая приводит к пропаданию сигнала на выходе FM-приемника при отношениях сигнал/помеха на его входе меньших нижнего порога частотного демодулятора. Такое предположение было экспериментально подтверждено на примере временной развёртки сигнала польской FM-радиостанции, отраженного от недоуплотненного следа короткоживущего метеора. В свою очередь положение первого локального максимума спектральной плотности сигнала на выходе FM-приемника обратно пропорциональна времени между первой и второй зонами Френеля, что позволяет оценивать скорость метеора по спектру сигнала FM-передатчика. При наблюдении с 10 по 23 июня 2010 г., во всплеске спектральной плотности выделялись сигналы польской FM-радиостанции, определялись максимумы спектральной плотности и по положению первого локального максимума оценивались скорости метеоров. Временная последовательность сигнала FM-радиостанции, отраженного от метеора, является важным отличительным признаком и может быть использована для разработки алгоритма автоматического распознавания метеоров по сигналу FM-радиостанции.

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с традиционными оптическими методами, радиолокационные методы являются мощным дополнительным современным средством изучения метеоров, позволяющим наблюдать метеоры круглые сутки. С этой целью применяются радиолокаторы обратного рассеяния радиоволн (BS-радары). В настоящее время широкому использованию BS-радаров в исследовательских целях препятствуют большие эксплуатационные затраты. В связи с появлением огромного числа TV- и FM-передатчиков, наиболее перспективным направлением исследований представляется наблюдение метеоров с помощью радаров, рассеивающих вперёд (FS-радаров).

Привлекательность направления состоит в простоте используемых технических средств и приемлемом объеме финансовых затрат, доступных в том числе и на широком любительском уровне исследований. Радионаблюдения метеоров незаменимы при изучении дневных метеорных потоков, а также потоков, активность метеоров в которых очень кратковременна. С помощью FS-радаров может решаться задача исследования метеорной активности.

При измерении амплитуды сигнала несущей частоты должно проводиться построение амплитудно-временной характеристики (ABX) сигнала, отраженного от метеора [10]. Сама по себе ABX является ярким объективным признаком сигнальной информации, который характеризует феномен отражения радиоволны от ионизированного следа метеороида. В случае изучения потоков метеорного вещества обнаружение

© Ф. И. БУШУЕВ, Н. А. КАЛУЖНЫЙ, А. П. СЛИВИНСКИЙ,
А. В. ШУЛЬГА, 2011

метеора должно обеспечиваться одновременно в трёх разнесенных пунктах. При этом в каждом из пунктов должно проводиться измерение временных задержек отраженного сигнала, имеющего интерференционные вариации АВХ, относительно базового пункта. По результатам этих измерений возможно определение радиантов отдельных метеоров [4]. В последние десятилетия бурно развивается высококачественное радиовещание на основе FM-передатчиков, когда вариации частоты несущей излучаемого сигнала пропорциональны амплитуде полезного звукового сигнала, что обеспечивает высокую помехозащищённость и высокое качество воспроизведения звука во время FM-приема. Однако при этом теряется возможность определения АВХ сигнала, отраженного от метеора, без специальной переделки приемного тракта, используя лишь стандартный выход FM-приемника. В то же время с помощью программного обеспечения, доступного в интернете, возможно осуществление спектрального анализа этого сигнала с выхода частотного детектора, то есть непосредственно со стандартного выхода FM-приемника. Ниже излагается метод восстановления аналога АВХ в результате анализа особенностей распределения спектральной плотности сигнала FM-передатчика, отраженного от метеора и прошедшего частотную демодуляцию в тракте FM-приемника.

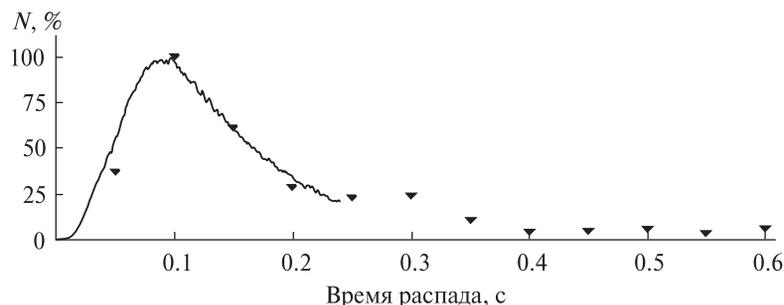
1. СТАТИСТИКА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ СЛЕДОВ МЕТЕОРОВ ПО СИГНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ FM-РАДИОСТАНЦИЙ

Согласно имеющемуся в настоящее время представительному объёму экспериментальных данных, полученных на BS-радарх, длительнос-

ти времени жизни подавляющего большинства наблюдаемых радиометеоров лежат в интервале от 20 до 500 мс. На рис. 1 показано распределение относительного количества N наблюдаемых метеоров по значениям их времени жизни согласно данным [6]. Наблюдения осуществлялись в северной Швеции с помощью BS-радар SKiYMET в 2005 г.

Видно, что подавляющее большинство радиотражений, наблюдаемых с помощью BS-радар SKiYMET, относятся к короткоживущим следам спорадических метеоров со временами распада, попадающими в указанный выше интервал 20—500 мс. На рис. 1 треугольниками представлена аналогичная статистика, полученная в результате обработки принимаемой в НИИ НАО сигналов радиовещательного FM-передатчика мощностью 120 кВт, расположенного в Кельце (Польша) и излучающего на частоте 88.2 МГц частотно-модулированный сигнал (см. <http://fmscan.org>). Прием сигналов метеорных отражений производился на шестиэлементную антенну горизонтальной поляризации типа «волновой канал». Для получения статистики стандартный выход встроенного в персональный компьютер TV/FM-тюнера типа VideoMate был подключен к линейному входу звуковой карты этого же ПК. Радиотражения от метеоров идентифицировались оператором по всплескам спектральной плотности сигнала на выходе частотного детектора FM-приемника. Оценка спектральной плотности сигнала, подаваемого на вход звуковой карты ПК, осуществлялась с помощью свободно распространяемой программы Spectrum-Lab (<http://freenet-homepage.de/dl4yhf/spectral1.html>), которая в качестве метода оценки спектра использует дискретное преобразование Фурье

Рис. 1. Распределения наблюдаемого относительного количества N метеоров (в процентах от максимального значения) по значениям их времени жизни, полученные по данным BS-радар SKiYMET [6] (линия) и по данным наблюдений в НИИ НАО сигналов от FM-передатчика (треугольники).



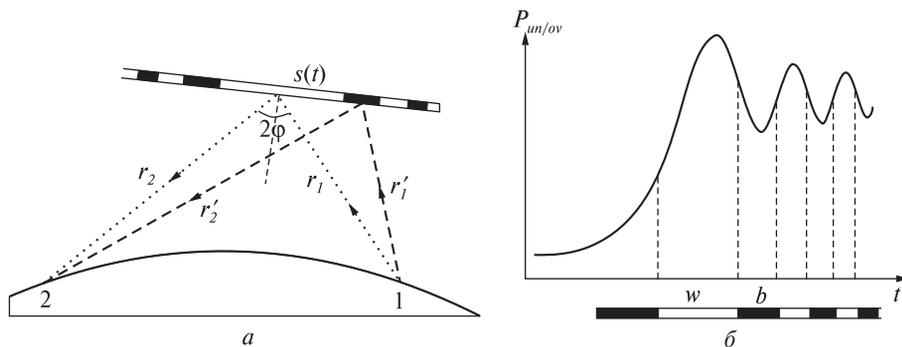


Рис. 2. Геометрия облучения следа метеороида (а) и иллюстрация происхождения френелевских осцилляций (б)

(ДПФ). Статистика, представленная на рис. 1 треугольниками, получена при следующих параметрах ДПФ: частота дискретизации 11025 Гц, объем выборки 1024. При этом темп оценки спектра был выбран равным половине длины импульсной характеристики ДПФ и составлял 46 мс. Наблюдения проводились в течение трех суток с 29 июня по 01 июля 2010 г. Хорошее соответствие статистик позволяет надеяться на успешную селекцию сигналов, отраженных от метеоров, по сигнальной информации FM-передатчиков.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ МЕТЕОРА ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ РАССЕЯНИЯ

Определение скоростей метеоров представляет интерес для наблюдаемости процесса абляции метеороида, определения плотности атмосферы [8] и характера дробления метеороидного тела. Кроме того, знание скорости метеороидов является важной информацией для оценки их масс. В процессе полёта метеороида при разогреве тела метеороида до температур 1800 К [1] начинается процесс абляции на высотах 70÷100 км за счёт ударного столкновения с ионами O_2 и N_2 атмосферы. Так как потенциал ионизации O_2 и N_2 намного превышает потенциалы ионизаций химических элементов Ca, Fe, Mg, Si и Na в составе метеороидов, плазма следа метеора состоит главным образом из ионов этих элементов.

На рис. 2, а показана геометрия облучения следа метеора, передатчик расположен в точке 1, приёмник — в точке 2 на расстояниях r_1 и r_2 от первой зоны Френеля соответственно. Здесь же представлена схема бегущих по следу метеора

зон Френеля, размером $s(t)$, с условным обозначением на нём светлых зон Френеля (w) и разделяющих их тёмных полос (b), образованных за счёт интерференции.

В соответствии с рис. 2, а можно записать:

$$\mathbf{r}'_1 + \mathbf{r}'_2 = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{s}(t),$$

или

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} + \mathbf{s}(t) \text{ и } |\mathbf{R}'| \approx R + \frac{s^2(t)}{R}. \quad (1)$$

Размер s можно определить из приближенных условий накладываемых на размер первой зоны Френеля, когда центр её виден на расстоянии r_1 от передатчика и r_2 от приёмника под углом 2ϕ между r_1 и r_2 :

$$|\mathbf{r}'_1 + \mathbf{r}'_2| = |\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2| + \lambda/2,$$

где λ — длина волны излучения. Для общего случая, когда отличен от нуля угол β между осью следа и плоскостью распространения, имеется приближенная связь [3]:

$$s^2 \approx \lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)}.$$

Согласно (1) мощность сигнала, отраженного от метеора, будет содержать множитель $|\int ds \exp(iks^2/R)|^2$, где $k = 2\pi/\lambda$, i — мнимая единица. После замены переменной

$$s(t) \approx x(t) \left[\lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \phi)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

интегрирование по новой переменной x формально проводится по всей длине следа от $-\infty$ до головы метеора x_0 . В результате для мощности

отраженного сигнала $P_{un/ov}$ от недоуплотнённых или от переуплотненных следов метеороидов получаем [12]

$$P_{un/ov}(t) = P_{un/ov}(0) \left(\frac{C^2(t) + S^2(t)}{2} \right), \quad (3)$$

где C и S хорошо известные из классической теории дифракции интегралы Френеля:

$$C(t) = \int_{-\infty}^{x(t)} \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx,$$

$$S(t) = \int_{-\infty}^{x(t)} \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx,$$

а $P_{un/ov}(0)$ — мощность отражения от линейного следа метеороида.

Переменная $x(t)$ связана естественным образом с соответствующим динамическим параметром — скоростью V пролёта метеором френелевских зон:

$$x(t) = Vt \left[\frac{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)}{\lambda r_1 r_2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где нулевой момент времени t выбирается при достижении метеором точки зеркального отражения. Уравнение (3) позволяет представить качественную картину временной зависимости мощности отраженного от недоуплотненного либо переуплотненного следа метеороида. На рис. 2, б представлены временные осцилляции мощности без учёта амбиполярной диффузии.

Если известен размер зон Френеля, скорость метеора может быть определена по измерению частоты осцилляций, представленных на рис. 2, б. Положения n -х границ зон Френеля зависят от длины волны и геометрии отражения. Согласно (2) $s(n)$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} s(n) &= \left[n\lambda \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2} = \\ &= \left[n\lambda \frac{\mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Если Δt_{nm} — время перемещения метеора из точки $s(n)$ в точку $s(m)$, то из выражения (5) можно получить известную формулу для скорости метеора V [12]:

$$V = \frac{m^{1/2} - n^{1/2}}{\Delta t_{nm}} \left[\frac{\lambda \mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2}.$$

В частности, для главного дифракционного максимума ($m = 1, n = 0$) получим

$$V = \frac{1}{\Delta t_{01}} \left[\frac{\lambda \mu}{(1 - \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi)} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Следовательно, для оценки скорости метеора необходимо знание временного интервала Δt_{01} и координат точки зеркального отражения от метеора, с помощью которых вычисляется множитель в квадратных скобках (6). Время Δt_{01} может быть определено из записи профиля мощности сигнала, отраженного от ионизированного следа метеороида, если скорость записи достаточно высока (порядка 1000 тактов в секунду). Таким образом, по известным координатам зеркальной точки отражения от метеороидного следа скорость метеороида оценивается с помощью выражения (6). Следует отметить, что форма осцилляций Френеля может искажаться неоднородностями в ионизации следа, торможением метеороида и диффузией его следа.

На рис. 3 приведены графики изменения во времени мощностей $P_{un}(t)$ и $P_{ov}(t)$ сигналов, отраженных от недоуплотнённых и переуплотнённых следов метеороидов соответственно. Представленные профили были получены на FS-радаре RAMSES (Radio Meteor Survey, Extended System) в Бельгии [12]. В качестве передатчика служила восточно-европейская вещательная радиостанция, излучающая на частоте 66.39 МГц. Скорость записи сигнальной информации проводилась с частотой 200 тактов в секунду. На обоих графиках отчетливо видны френелевские осцилляции.

3. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ АНАЛОГА АВХ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕТЕОРОВ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ FM-РАДИОСТАНЦИЯМИ

Как уже отмечалось, в связи с появлением достаточно большего числа TV- и FM-передатчиков, наиболее перспективным направлением представляется наблюдение метеоров с помощью рассеивающих вперёд радаров. С появлением

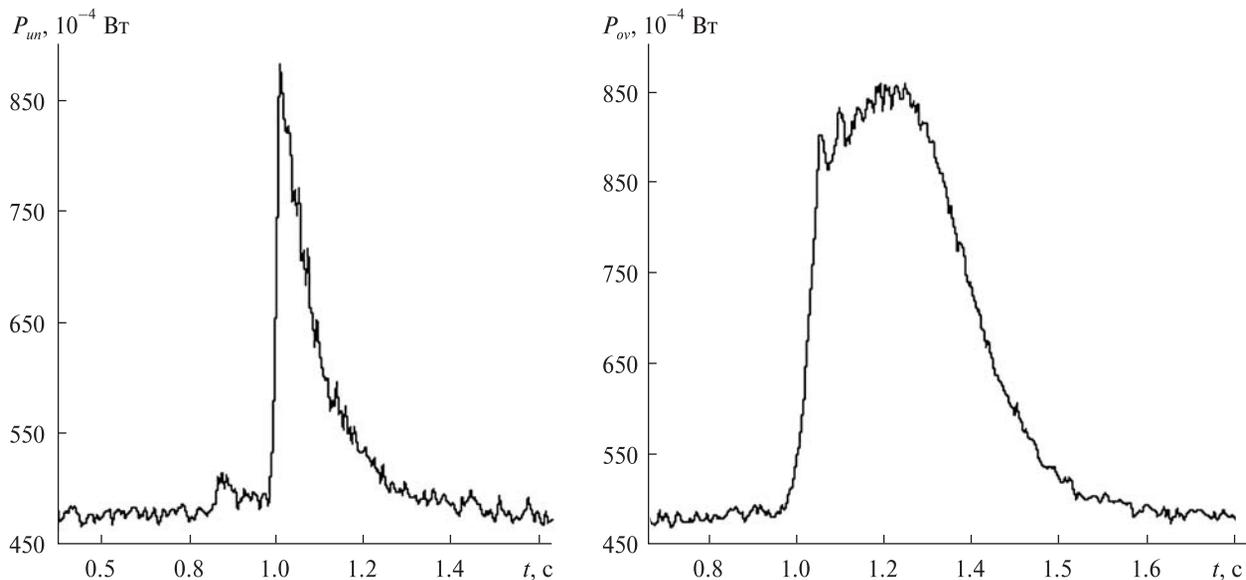


Рис. 3. Экспериментальные профили мощностей сигналов $P_{un}(t)$ (а) и $P_{ov}(t)$ (б), отраженных от недоуплотнённых и переуплотнённых следов метеороидов соответственно [12]

FM-передатчиков с большими мощностями излучения увеличивается объём контролируемого пространства. Начиная с 1980-х гг., среди любителей метеорной астрономии все более популярными становятся пассивные методы регистрации метеорных сигналов в радиодиапазоне (88—108 МГц). В это же время появились многочисленные любительские программы спектральной обработки сигналов FM-станций. После доработки приемных TV- и/или FM-устройств в части регистрации амплитуды несущей возможно определение АВХ сигнала, отраженного от следа метеороида, в качестве основного отличительного признака. Предлагаемая нами методика не требует доработок приемных устройств и основана на использовании амплитудной модуляции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на движущемся метеорном следе.

Известно, что при уменьшении отношения сигнал/помеха (Q) на входе частотного демодулятора ниже определенного значения, называемого нижним порогом, зависимость ошибки демодуляции от Q становится нелинейной, а именно, ошибка резко возрастает при незначительном уменьшении Q [2]. Величина этого порога по разным оценкам может составлять 5—8 дБ [5] и даже 20 дБ [9]. Оценки отношения сигнал/

помеха на входе FM-приемника, расположенного в Николаеве и принимающего на частоте 88.2 МГц FM-радиостанцию Кельце, показали, что в самом благоприятном случае переуплотненного следа метеора с линейной плотностью электронов в следе 10^{14} м^{-1} , расположенного в плоскости распространения электромагнитной волны ($\beta = 0^\circ$), величина $Q < 35$ дБ. При другой ориентации следа и плоскости распространения ($\beta > 30^\circ$) $Q < 25$ дБ. Оценки мощности сигнала при этом проводились с использованием соотношений, которые даны в работе [7], а измеренное значение уровня помех составило величину 0.5 мкВ. Таким образом, даже в самом благоприятном случае мощность сигнала на входе FM-приемника может быть ниже верхнего порога ограничения, которому по нашим оценкам соответствует $Q > 30$ дБ. Для большинства же метеоров следует ожидать, что величина Q находится вблизи или меньше нижнего порога частотного демодулятора.

Дополнительные потери при частотной демодуляции могут возникать за счет изменения структуры принимаемого сигнала в интерференционных минимумах, когда отражения от наиболее плотных участков метеороидного следа компенсируют друг друга, а общий уровень сигнала обуславливается отражениями от более раз-

мытых, диффузных участков следа, что приводит к большому искажению сигнала. Следовательно, при отношении сигнал/помеха, меньших нижнего порога, во время прохождения **b**-полос зон метеорного следа, показанных на рис. 2, **б**, должно наблюдаться практически полное пропадание сигнала FM-передатчика на выходе частотного демодулятора, т. е. сигнал будет проявляться в виде чередований появлений и пропаданий, иными словами должен представлять собой временную последовательность импульсов, в соответствии с последовательностью интерференционных максимумов. Моделирование такого процесса можно провести по наблюдаемым данным на примере спектральной обработки картин отражения, приведенных на рис. 3. Очевидно, что такая процедура тождественна спектральному

анализу временной последовательности мощности сигнала отраженного от следа метеороида, которая описывается выражением типа (4), зависящим от интегралов Френеля.

Отрезок времени $T = 200$ мс (с $t = 1$ по $t = 1.2$ с), на который (см. рис. 3, *a*) пришлось основная мощность сигнала $P_{un}(t)$, был разбит на $N_T = 101$ значений (точек), или на $(N_T - 1)$ интервалов длительностью $\Delta t = T / (N_T - 1) = 2$ мс. Пусть \tilde{P}_{un} — мощность отраженного сигнала на выходе частотного демодулятора. Последовательность $\tilde{P}_{un}(i)$ в точках $i = 0, (N_T - 1)$ полагалась равной либо исходной экспериментальной мощности $P_{un}(i)$, либо уровню помех, если точка i попадала в область интерференционного минимума. В качестве оценки уровня помехи при этом использовалась средняя мощность, наблюдавшаяся

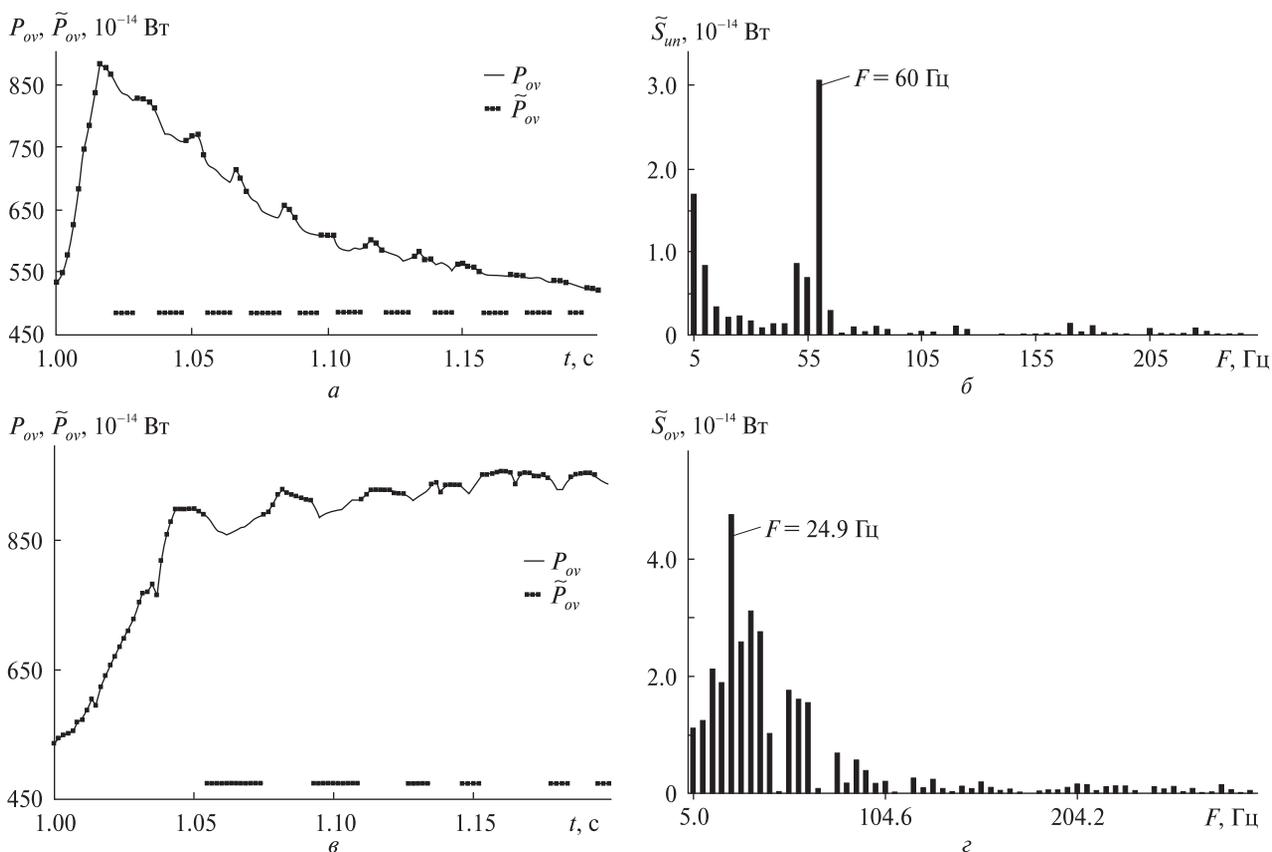


Рис. 4. Экспериментальные (тонкие линии) и синтезированные по ним (точки) числовые последовательности мощности FM-сигналов, отраженных от недоуплотнённого (*a*) и от переуплотнённого (*в*) следов метеороидов, а также соответствующие синтезированным последовательностям диаграммы распределения по фильтрам плотности спектральной мощности сигналов (*б* и *г*)

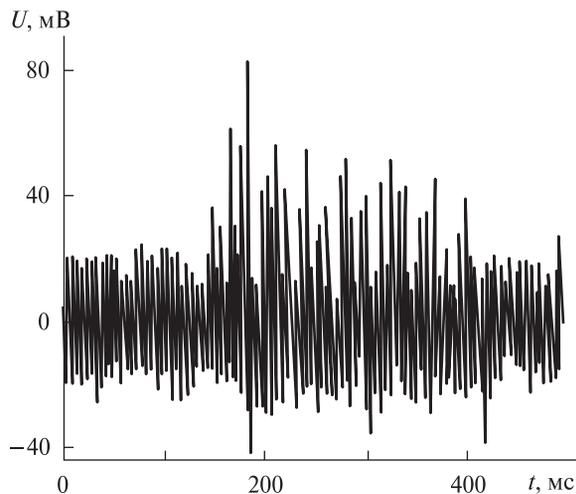


Рис. 5. Осциллограмма сигнала польской FM-станции, отраженного от метеора, полученная 25 мая 2010 г. в 22:19 UT

ся до появления отраженного сигнала. То есть, предполагается, что в интервале времени, соответствующем интерференционным минимумам, отраженный от метеора сигнал FM-передатчика на выходе частотного демодулятора пропадает вследствие следующих причин, которые упоминались выше: а) понижения уровня сигнала и б) изменений структуры сигнала. Синтезированная таким образом последовательность с учётом полного пропадания сигнала FM-передатчика (уменьшением до уровня помехи) в соответствии с интерференционной картиной показана на рис. 4, а точками, а исходная экспериментальная последовательность $P_{un}(t)$ — тонкой линией.

На рис. 4, б приведено фурье-преобразование от синтезированной последовательности $\tilde{P}_{un}(i)$ длиной N_T в виде распределения спектральной плотности мощности сигнала \tilde{S}_{un} , отраженного от недоуплотнённого следа метеороида. Ширина полосы анализа по частоте составляет величину $f_{dis} = 1/\Delta t = 500$ Гц, а ширина фильтра равна $\Delta f = f_{dis}/N_T = 5$ Гц. В соответствии с данными, представленными на рис. 4, б, главный максимум спектральной плотности синтезированного сигнала $\tilde{P}_{un}(i)$ находится в фильтре f_{12} , центральная частота которого равна $F = f_{12} = 12\Delta f = 60$ Гц. Этой частоте $F = 60$ Гц соответствует временной интервал $1/F \approx 17$ мс. С другой

стороны, согласно рис. 3, а и рис. 4, а (точки), время между первыми интерференционными пиками примерно равно 16 мс. Этот факт указывает на возможность рассматривать последовательность, подобную представленной на рис. 4, а (точки), в качестве аналога АВХ, а спектральную картину сигнала FM-радиостанции, отраженного от метеора и прошедшего частотную демодуляцию, можно рассматривать в качестве аналога спектра АВХ и, в частности, использовать для оценки скорости метеороида. Для сигнала, отраженного от переуплотнённого следа метеороида, на основе наблюдательных данных (рис. 3, б), была выполнена аналогичная процедура синтеза аналога АВХ ($\tilde{P}_{ov}(i)$) и оценки его спектра. Полученная временная последовательность $\tilde{P}_{ov}(i)$ и ее спектр \tilde{S}_{ov} приводятся на рис. 4, в (точки) и рис. 4, г соответственно. В этом случае $N_T = 120$, $\Delta t = 1.687$ мс, $f_{dis} = 1/\Delta t = 593$ Гц, ширина фильтра $\Delta f = 4.98$ Гц. Локальный максимум, согласно рис. 4, г, находится в фильтре с номером 5, следовательно, этому максимуму спектральной плотности на частоте $F = 5 \cdot 4.98 = 24.9$ Гц, соответствует временной интервал $\Delta t_{01} = 1/F \approx 40$ мс, что совпадает со значением Δt_{01} , которое можно определить непосредственно по графику рис. 3, б или рис. 4, в (тонкая линия).

4. МЕТОД ОЦЕНКИ СКОРОСТИ МЕТЕОРА ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕТЕОРОВ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ FM-РАДИОСТАНЦИЯМИ

Таким образом, временная последовательность сигнала FM-передатчика при отражении от метеороидного следа должна представлять собой последовательность импульсов, подобных представленным на рис. 4, а (точки) и 4, в (точки), каждый из которых может быть модулирован в соответствии со звуковыми частотами речевых, либо музыкальных фонем.

На рис. 5 приводится типичный снимок осциллограммы на интервале времени длиной 500 мс с сигналом польской FM-станции, отраженным от короткоживущего (~200 мс) следа метеороида.

Из данных, представленных на рис. 5, следует, что сигнал, отраженный от короткоживущего

метеороидного следа, действительно представляет собой чередование появлений и пропаданий, как и на синтезированных временных последовательностях, приведенных на рис. 4, а (точки) и рис. 4, в (точки). Кроме того, одинаковый ход огибающих на рис. 4, а и рис. 5 указывает на то, что экспериментально наблюдаемый сигнал сформировался на недоуплотненном метеороидном следе. Следовательно, фурье-преобразование сигнала FM-станции имеет простую интерпретацию в качестве аналога фурье-преобразования АВХ как способа определения скорости метеороида. Необходимо отметить, что наблюдаемая на рис. 5 временная последовательность является важным отличительным признаком метеора и может быть использована для разработки алгоритма автоматического обнаружения метеороидного следа.

Для непосредственной приближенной оценки скорости метеороида положим, что зеркальная точка отражения от метеороидного следа принадлежит направлению, на котором реализовался максимум спектральной плотности. Для этого направления по экспериментальному положению первого локального максимума спектральной плотности определяем значение частоты F . Согласно (6) в пренебрежении угловыми зависимостями можно записать

$$V = F(\lambda\mu)^{1/2} \quad (7)$$

Пользуясь свойством зеркальности точки отражения, известным расстоянием D до FM-передатчика и известным значением высоты h точки отражения, будем полагать, что малая полуось b эллипсоида, в плоскости которого происходит отражение от следа метеороида, слабо отличается от высоты h , так что $b \approx h + \Delta h$. В свою очередь, большая полуось a эллипсоида связана с b и D соотношением $a^2 = b^2 + D^2/4$. С использованием канонического уравнения эллипса $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ и определений $r_{1,2} = a \pm \varepsilon x$, $\varepsilon = D/(2a)$ выражение для μ примет вид

$$\mu = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \approx \frac{D}{4} \sqrt{1 + \frac{4h}{D^2} \left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right)} \times \left\{ 1 - \frac{2\Delta h}{h} \left[1 - \frac{4h}{D^2} \left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right) \right] \right\}.$$

В допущении $D \gg h$, μ можно оценивать с помощью приближенного выражения

$$\mu \approx \frac{D}{4} \left(1 - \frac{2\Delta h}{h}\right). \quad (8)$$

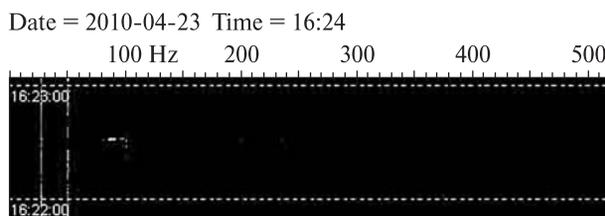
Выражение (8) при подстановке в (7) позволяет получить приближенную оценку скорости метеора:

$$V \approx \frac{F}{2} \sqrt{\lambda D} \left(1 - \frac{2\Delta h}{h}\right). \quad (9)$$

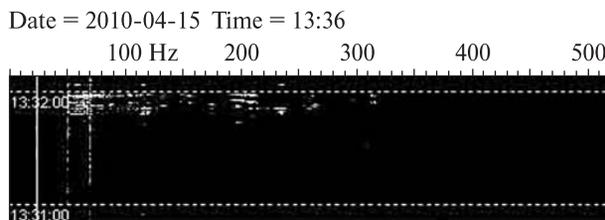
Следует отметить, что из выражения (9) вытекает существенное ограничение для F , обусловленное верхним экспериментальным пределом скорости метеора $V \approx 80$ км/с.

5. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Типичный снимок с экрана монитора распределения спектральной плотности для короткоживущего следа метеора приводится на рис. 6, а. Как и в случае определения количества наблюдаемых метеоров в зависимости от их времени жизни, для оценки спектральных характеристик принимаемых сигналов использовалась программа SpectrumLab, позволяющая в текущем времени осуществлять оценку спектра сигнала и запись на жесткий диск компьютера изображений спектральной плотности в виде, представленном на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Снимки с экрана монитора распределения спектральной плотности сигнала польской FM-станции, отраженного от короткоживущего (а) и от долгоживущего (б) следа метеороида

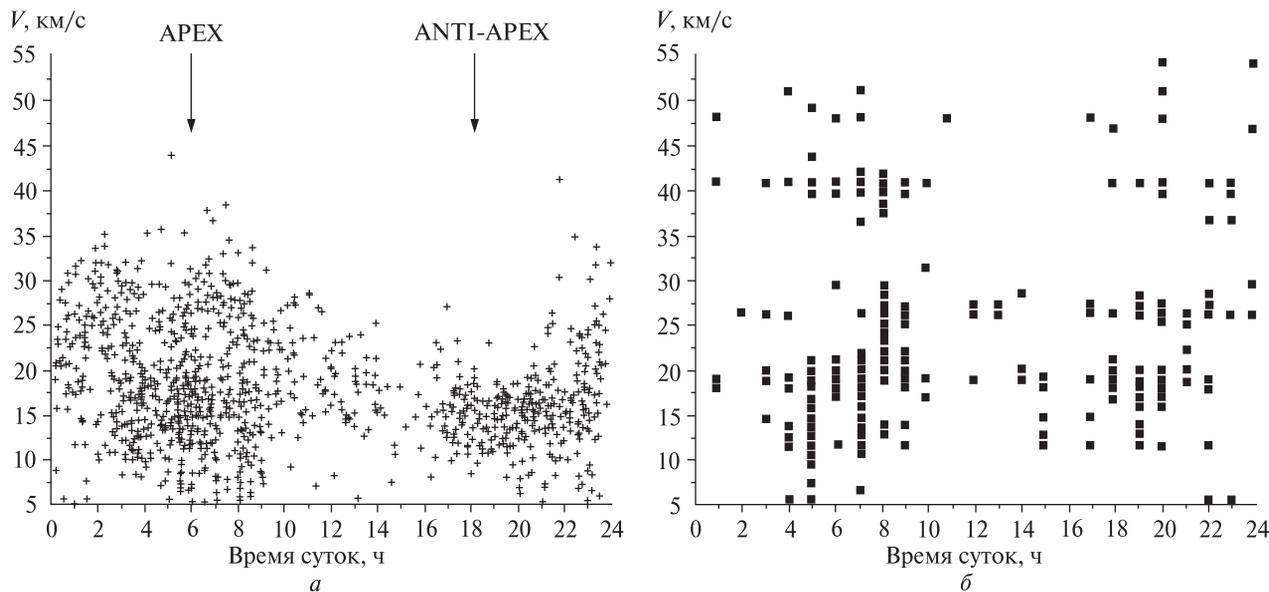


Рис. 7. Суточная динамика значений скоростей метеороидов (V): a — по данным BS-радар SKiYMET [11], b — полученная НИИ НАО по сигнальной информации FM-станции в Кельце (88.2 МГц)

Спектральные плотности, приведенные на рис. 6, a , получены при следующих параметрах ДПФ: частота дискретизации 11025 Гц, объем выборки 16384, что соответствует ширине фильтра $\Delta f = 0.71$ Гц. При этом темп оценки спектра был выбран равным половине длины импульсной характеристики ДПФ и составлял 0.743 мс, а ширина полосы анализа равнялась 1 кГц. На основании этого под короткоживущими следами метеороидов здесь подразумеваются такие, для которых время жизни $\tau < 0.7$ с. На рис. 6, a интервал времени между пунктирными линиями составляет 60 с. Наблюдения проводились в пункте регистрации НИИ НАО по сигнальной информации FM-передатчика расположенного в Кельце на расстоянии $D \approx 1000$ км от Николаева. В частности, согласно экспериментальным данным, приведенным на рис. 6, a , первый локальный максимум пришёлся на частоту $F \approx 80$ Гц. Для польской FM-радиостанции при $\Delta h \approx 10$ км коэффициент при F в выражении (9) приближенно будет равен $\sqrt{\lambda D} (1 - 2\Delta h/h) \approx 0.7$, тогда для приближенной оценки скорости метеороида получим $V \approx F \cdot 0.7$ км = 56 км/с.

С увеличением времени жизни метеороидного следа (до десятков секунд), покадровая картина

распределения локальных максимумов спектральной плотности от события к событию может сильно отличаться. На рис. 6, b представлена динамика распределения локальных максимумов спектральной плотности для долгоживущего метеора, при тех же параметрах обработки, как и в случае данных, приведенных на рис. 6, a . Картина распределения локальных максимумов спектральной плотности сигнала, подобную представленной на рис. 6, b , можно объяснить эффектом деления массы метеороида. Действительно, при наличии деления метеороидного тела типа квазинепрерывного отделения мелких частиц [1] геометрия отражения такова, что отраженный сигнал формируется за счёт последовательного влёта частиц дробящегося метеороидного тела в одну и ту же область пространства. В этом случае следует ожидать многократного повторения от такта к такту оценок спектра сигнала FM-станции, и тогда значение F можно определять по положению первого локального максимума спектральной плотности в любом такте. Разумеется, столь приближенные оценки не совсем адекватны наблюдательным данным, однако могут отражать качественную картину суточного распределения скоростей метеороидов.

На интервале времени с 10 по 23 июня 2010 г. по сигнальной информации FM-станции в Кельце (88.2 МГц), спектры сигналов визуально отбирались по типам, которые подобны представленным на рис. 6. При этом для лучшего соответствия спектральной обработке наиболее вероятному значению времени жизни метеоров (см. рис. 1), объем выборки для ДПФ был задан равным 2048, а темп оценки спектра — 93 мс, что составит половину длины импульсной характеристики ДПФ. Приближенная оценка скоростей в соответствии с (9) проводилась на основе выражения $V \approx 0.7 \cdot F$. На рис. 7 представлены почасовые значения оценок скоростей V .

Из данных, приведенных на рис. 7, следует хорошее качественное согласие статистик скоростей метеороидов, полученных с помощью BS-радаров [11] и с помощью предложенной методики оценки скорости по сигнальной информации FM-радиостанций.

Следует отметить, что как для BS-, так и FS-радаров оценивается проекция полной скорости метеороида на направление наблюдения. Для оценки полной скорости необходимы одновременные многопозиционные наблюдения метеороидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлекательность метода измерений отраженных от метеоров сигналов FM-радиостанций состоит в возможности использования унифицированных приёмников, доступного программного обеспечения и простых антенных систем. В связи с этим правомерна постановка вопроса о создании круглосуточной службы регистрации метеоров, оценки их физических параметров и определения радиантов метеоров. Определение количества наблюдаемых сигналов, отраженных от метеоров, в зависимости от их времени жизни показало их удовлетворительное согласие с наблюдениями на BS-радаров, что позволяет надеяться на возможность успешной селекции сигналов отраженных от ионизированных следов метеороидов по сигнальной информации FM-передатчиков.

Разработана методика восстановления аналога АВХ по спектру сигнала FM-радиостанции, отраженного от метеора. Методика основана на использовании амплитудной модуля-

ции FM-сигнала, обусловленной френелевской интерференцией на метеорном следе, которая приводит к пропаданию сигнала на выходе FM-приемника при отношениях сигнал/помеха на его входе, меньших нижнего порога частотного демодулятора. Такое предположение было экспериментально подтверждено на примере временной развёртки сигнала польской FM-радиостанции, отраженного от недоуплотненного следа короткоживущего метеора. Следовательно, временная последовательность мощности сигнала FM-передатчика при отражении от метеора представляет собой последовательность импульсов, каждый из которых в свою очередь содержит звуковые фонемы. При допущении доминирования последовательности импульсов, спектр аналога АВХ должен быть идентичен спектру мощности сигнала, отраженного от метеора. В свою очередь частота первого локального максимума плотности спектра мощности аналога АВХ обратно пропорциональна времени между первой и второй зонами Френеля, что позволяет оценивать скорость метеороидов. По экспериментальным картинкам спектра сигнала польской FM-радиостанции в Кельце (частота 88.2 МГц) визуально выделялись максимумы спектральной плотности, и по ним оценивались скорости метеороидов. Необходимо отметить также, что временная последовательность, приведенная на рис. 5, является важным отличительным признаком метеоров и может быть использована для разработки алгоритма их автоматического обнаружения.

1. *Бронштэн В. А.* Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981. — 416 с.
2. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. — М.: Сов. радио, 1975. — Том II: Теория нелинейной модуляции. — 344 с.
3. *Долуханов М. П.* Дальнее распространение ультракоротких волн. — М.: ГИЛ по вопросам связи и радио, 1962. — 177 с.
4. *Лыков Ю. В., Горелов Д. Ю.* Многопозиционная разнесенная радиолокационная станция для исследования метеорного вещества в атмосфере Земли // Восточно-Европейский научно-технический сборник. — 2010. — № 1. — С. 5—15.
5. *Пат. 2179786* Российской Федерации. Устройство приема частотно-моделируемых сигналов / А. М. Кар-

- лов, Е. В. Волхонская, Е. Н. Авдеев. — Оpubл. 20.02.2002. — (<http://ru-patent.info/21/75-79/2179786.html>).
6. Ballinger A. P., Chilson P. B., Palme R. D., Mitchell N. J. On the validity of the ambipolar diffusion assumption in the polar mesopause region // *Annales Geophysicae*. — 2008. — **26**. — P. 3439—3443. — (www.ann-geophys.net/26/3439/2008/).
 7. Charania A. C. Networks on the Edge of Forever: Meteor Burst (MB) Communication Networks on Mars. Version 1.0. Atlanta: SpaceWorks Engineering, Inc. (SEI). 2002. — 51 p. — (http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/815Charania.pdf).
 8. Hunt S. M., Oppenheim M., Close S., et al. Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high-gain radar // *Icarus*. — 2004. — **168**, N 1. — P. 34—42.
 9. Mahmud K., Mukumoto K., Fukuda A. A Meteor Burst Communication System with Dynamic Channel Estimation and Variable Modulation Type. Department of Electrical Engineering, Shizuoka University, 1997. — 8 p. — (<http://www2.nict.go.jp/w/w122/old/mt/b193/member/mahmud/kmahmud/docs/icspat.pdf>).
 10. Oleynikov A. N., Sosnovchik D. M. Research of Amplitude-Time Characteristic of Television Signal Reflected from a Meteoric Trail in Spaced Radar System // Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science: Proc. of the international conference TCSET 2006. — Lviv, 2006. — P. 291—293.
 11. Stober G., Jacobi Ch. Meteor head velocity determination. — *Wiss. Mitteil. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig* March 29, 2007. — 10 p. — (http://www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/2007_LIM_5.pdf).
 12. Wislez Jean-Marc. Forward scattering of radio waves off meteor trails. Urania Public Observatory, Mattheessensstraat 60, B-2540 Hove, Belgium, 1994. — 22 p. — (<http://radiomet.mcse.hu/cikkek/wisje.pdf>).

Надійшла до редакції 09.08.10

F. I. Bushuev, N. A. Kalyuzhny, A. P. Slivinsky, A. V. Shulga

THE USE OF FM-SIGNALS OF BROADCASTING STATIONS FOR METEOR QUANTITY INVESTIGATION

Using the signal information of FM-transmitters, we analysed the quantity of observable signals reflected from meteors, depending on their life time. A comparison of the obtained statistics with some earlier known statistics shows their good agreement. This points to the possibility of successful selection of meteors with the use of signals from FM-transmitters. We developed a procedure for the analogue restoration of the amplitude-time characteristic using the spectrum of a signal of a FM-transmitter. The procedure is based on the use of the amplitude modulation of a FM-signal. The amplitude modulation is caused by the Fresnel interference on a meteor trail which results in the disappearance of the signal at the output of a FM-receiver in the case when the signal-to-noise ratio at its input is less than the lower threshold of the frequency demodulator. This assumption was experimentally confirmed by the example of time development of a Polish FM-radio station signal reflected from the underdense trail of a short-living meteor. The position of the first local maximum of the spectral density of a signal at the FM-receiver output is inversely proportional to the time between the first and second Fresnel zones. This allows one to estimate the velocity of a meteor from the spectrum of a FM-transmitter signal. Using the observations from 10 to 23 June 2010, signals of the Polish FM-radio station were detected through spectral density bursts and spectral density maxima were determined. Besides, velocities of meteors were estimated using the first local maximum positions. The time sequence of the FM-radio station signal reflected from a meteor is an important distinctive feature of the meteor and can be used to develop an algorithm for automatic detection of meteors using a FM-radio station signal.