

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ МЕТЕОРОВ

Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук

Радиолокационный комплекс, описанный в работе [1], помимо своего основного назначения — измерения радиантов индивидуальных метеоров — может быть использован для определения высот слабых метеоров. Достигается это благодаря узости диаграмм направленности антенн. Конструкция и основные расчетные параметры антенно-фидерных устройств комплекса описаны в работе [2]. Антенны выполнены в виде линеек вибраторов с переменным шагом, помещенных в уголкового отражатель. Для определения эффективной чувствительности аппаратуры необходимо знать коэффициент усиления антенн, а для определения ошибок измерения высот принятым методом — ширину диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование антенн.

Измерение диаграммы направленности антенн

Диаграмма направленности антенн является характеристикой, не зависящей от расстояния. Однако это справедливо лишь на больших расстояниях от антенн. Для каждой антенны в зависимости от ее типа,

размеров, длины волны и требуемой точности измерений существует минимальное расстояние $R_{\text{мин}}$, на котором диаграмма направленности получается практически такой же, как и на бесконечности. Измерения на расстояниях, меньших $R_{\text{мин}}$, могут привести к ошибочным результатам. Расстояние $R_{\text{мин}}$ характеризует так называемую дальнюю зону антенны (зону Фраунгофера), где в режиме передачи выполняются три условия: а) амплитуды векторов поля убывают пропорционально R^{-1} ; т. е. можно пренебречь их компонентами, пропорциональными R^{-2} и R^{-3} ; б) при определении амплитуд сферических волн, излучаемых элементами антенны, можно полагать расстояния r от точки наблюдения до всех элементов одинаковыми, т. е. $r \approx R$; в) при определении фаз этих волн в точке наблюдения можно полагать лучи, соединяющие все элементы антенны с точкой наблюдения, параллельными.

Если линейные размеры антенны больше длины волны ($\frac{L}{\lambda} \gg 1$), наиболее жестким становится последнее условие, которое выполняется на расстоянии нескольких сотен λ , когда заведомо справедливы первые два условия. Расчеты показывают [3], что если допустить ошибку в определении напряженности поля не более 1%, а в определении коэффициента усиления 2%,

$$R_{\text{мин}} = \frac{L^2}{0,32\lambda}. \quad (1)$$

Если принять максимальную ошибку фазы волны как результат предположения о параллельности лучей равной $\frac{\pi}{8}$,

$$R_{\text{мин}} = \frac{L^2}{0,5\lambda}. \quad (2)$$

Приведенные выше величины $R_{\text{мин}}$ справедливы, когда размеры вспомогательной антенны значительно меньше размеров исследуемой антенны.

Если антенна поставлена в режим приема, в пределах объема, который она занимает, волна должна быть плоской, амплитуды векторов поля и поляризации — одинаковыми. Требование плоской волны с желаемой степенью точности обеспечивается выполнением условий дальней зоны. Выбор метода снятия диаграммы направленности антенны зависит от ее типа и размеров, от местных условий и возможностей исследователей.

Рассматриваемая антенна представляет собой довольно громоздкое стационарное сооружение с $L = 180$ м. При $\lambda = 13,5$ м $R_{\text{мин}} = 7,5$ км. Поскольку максимум диаграммы направленности антенны расположен под углом 45° к горизонту, измерить ее можно лишь с помощью самолетов или вертолетов. Однако использование вертолетов ограничивается их небольшим потолком.

Антенны исследовались в режиме приема с помощью самолета, на котором был установлен малогабаритный передатчик. В качестве излучающей антенны использовался полуволновой вибратор, который буксировался на некотором расстоянии от самолета, чтобы исключить влияние корпуса самолета на диаграмму направленности вспомогательной антенны. Были приняты меры для стабилизации ее положения.

На рис. 1 показана схема измерения диаграммы направленности антенны с автоматической регистрацией координат самолета и амплитуд сигналов. В качестве измерительного приемника \mathcal{Z} используется основной приемник комплекса, поэтому самолетный передатчик работает в импульсном режиме. Радиолокационная станция \mathcal{B} автоматически сопро-

вождает самолет 1 и с помощью сельсинов выдает непрерывные координаты самолета в индикатор. Фоторегистратор 7 работает в ждущем режиме и производит покадровую регистрацию на киноплёнке амплитуды принятых импульсов и шкал индикаторных сельсинов.

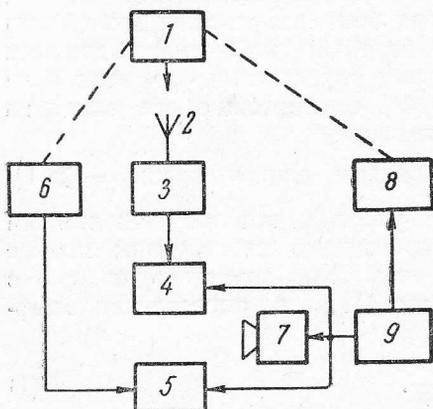


Рис. 1. Функциональная схема измерения диаграммы направленности антенны.

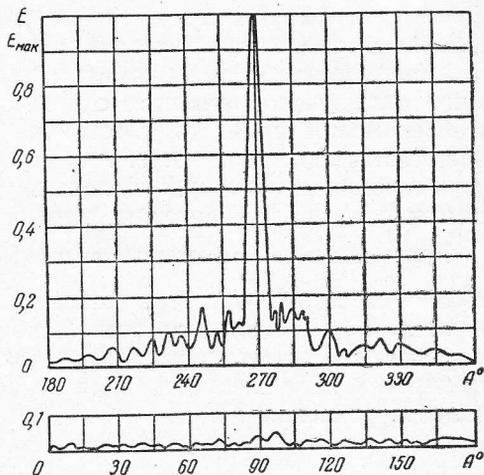


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости.

Блок управления регистрацией 9 синхронизирует развертку электронно-лучевого индикатора 4, подсвет шкал сельсинов и продергивание пленки в фотокамере. Частоту запуска регистратора (частоту кадров) можно менять в нужных пределах в зависимости от скорости измерения угловых координат самолета и ширины диаграммы направленности антенны. С помощью связанной радиостанции 8 оператор руководит полетом. Эта схема обеспечивает достаточную точность измерений, а также объективность и документальность результатов.

Совершая полеты по кругу на разных высотах, можно снять диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости при разных углах места. На основании этих данных построена диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости. На рис. 2 изображена экспериментальная диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости. Ширина диаграммы направленности по половинной мощности 4,5°.

Измерение коэффициента усиления антенны

Приближенно коэффициент усиления антенны можно определить по формуле

$$G = \frac{40\,000}{\Delta\varphi\Delta\theta}, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ — ширина диаграммы направленности в градусах по половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Формула (3) справедлива при низком уровне боковых лепестков.

Более точно коэффициент усиления антенны был определен методом сравнения. Схема измерения аналогична рис. 1, но вместо одной исследуемой антенны к измерительному приемнику через электронный комму-

татор подключается еще эталонная антенна, в качестве которой используется полуволновый вибратор. Для измерения коэффициента усиления необходимо, чтобы максимум диаграмм направленности исследуемой и эталонной антенн совпадали. Для этого высоту подъема эталонной антенны выбирают из условия

$$h = \frac{\lambda}{4 \cos \theta_{\max}}. \quad (4)$$

Угол θ отсчитывается от вертикали. Для исключения влияния параметров почвы вибратор расположен над металлической сеткой.

Коэффициент направленного действия полуволнового вибратора, расположенного над идеальной землей:

$$D = \frac{480}{R_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где R_{Σ} — сопротивление излучения.

Для наших частот принято считать, что $G \approx D$ и $R_{\Sigma} \approx R_a$, где R_a — входное сопротивление антенны. R_{Σ} зависит от высоты h и может принимать различные значения. Э. д. с., наводимая на клеммах антенны в максимуме диаграммы направленности:

$$e = E \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{GR_a}{120}}, \quad (6)$$

где E — напряженность поля.

Если для двух антенн $R_{a_1} = R_{a_2}$, то

$$\frac{e_1}{e_2} = \sqrt{\frac{G_1}{G_2}},$$

откуда

$$G_2 = G_1 \left(\frac{e_2}{e_1} \right)^2.$$

Если обе фидерные линии согласованы с антеннами и с приемниками.

$$G_2 = G_1 \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^2 \quad (7)$$

(u — напряжение на входе приемника).

Таким способом были измерены коэффициенты усиления передающей (244) и приемной антенн (260).

Определение высот отражающих точек

Узость диаграммы направленности приемной и передающей антенн в основном пункте была использована для определения высот отражающих точек радиометеоров до $+12^m$.

Действительно, ввиду зеркальности радиолокационных отражений от метеорного следа координаты радианта индивидуального метеора A и z связаны с координатами отражающей точки метеорного следа a и ε следующим соотношением:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = -\operatorname{tg} z \cos (A - a), \quad (8)$$

где z и A — зенитный угол и азимут радианта;

ε и a — угол места и азимут отражающей точки.

Поскольку ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны равна $4^{\circ}5'$, можно полагать, что азимут отражающей точки a известен и равен азимуту осевой линии главного лепестка антенны с ошибкой $\pm 2^{\circ}5'$. Тогда высота отражающей точки может быть определена при известной дальности и координатах радианта с учетом (8) из соотношения

$$h = D \sin \varepsilon + \frac{D^2 \cos^2 \varepsilon}{2R}, \quad (9)$$

где D — наклонная дальность, измеряемая радиолокатором;
 R — радиус Земли.

Второй член в выражении (9) учитывает сферичность Земли и при оценке ошибки определения высоты не принимался во внимание из-за его малости.

Погрешность в определении высоты выражается через погрешности входных величин следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 = \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + [1 + \operatorname{tg}^2 z \cos^2 (A - a)]^{-2} \left[\left(\frac{2\Delta z}{\sin 2z}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 (A - a) \times \right. \\ \left. \times (\Delta A^2 + \Delta a^2) \right]. \quad (10)$$

Ошибка в определении высоты зависит от координат радианта, дальности и ошибок определения этих величин. Она наименьшая при $A - a = 180^{\circ}$ и $z = 45^{\circ}$. Эти значения будем называть в дальнейшем оптимальными координатами радиантов.

Ошибка в определении координат радианта, как показали исследования [4], зависит от размера и ориентации баз, скорости метеора и координат радианта, скорости турбулентного ветра, частоты повторения импульсов, а также расположения радианта относительно баз. Если базы расположены под углом 45° к направлению излучения, ошибки в координатах будут наименьшими для тех радиантов, которые расположены против оси симметрии антенны, т. е. для большей части наблюдаемой области.

Если считать, что ошибки в сдвиге равны 0,5 импульса, тогда ожидаемые ошибки в зенитном угле равны $\pm 5^{\circ}$, а в азимуте $\pm 3^{\circ}$.

Реальная оценка ошибок наблюдения была выполнена по результатам наблюдения потока Геминид. Поскольку зенитный угол и азимут радианта непрерывно меняется во время наблюдения потока, были получены ошибки в прямом восхождении и склонении: $\Delta \alpha = \pm 3,6^{\circ}$, $\Delta \delta = \pm 2,6^{\circ}$. Они несколько меньше, как можно было бы ожидать из теоретической оценки, вероятно, потому, что сдвиги дифракционных картин относительно друг друга определяются точнее, чем было принято в теоретической оценке.

Если считать, что $\Delta z = 5^{\circ}$, $\Delta A = 3^{\circ}$, $\Delta a = 2,5^{\circ}$, то $\Delta h = 0,09h$, если z и $A - a$ близки к оптимальным значениям. Так как средние наблюдаемые высоты метеоров до $+12^m$ равны 90 км, то $\Delta h = \pm 8$ км.

В 1969 году в ХПИ измерения были выполнены с частотой повторения 500 имп/сек. При этом условии $\frac{\Delta h}{h} = 0,06$, т. е. ошибка в определении высоты составляет $\pm 5,5$ км.

Следует отметить, что излагаемая методика определения высот применима только для метеоров, регистрируемых главным лепестком диаграммы направленности антенны. Теоретические оценки, выполненные по

диаграмме направленности, полученной из облета, говорят о том, что с боковых и задних лепестков можно регистрировать примерно 10—15% общего числа метеоров (при расчете принято $s = 2$).

С помощью азимутмера, дающего возможность оценить, приходит ли отраженный сигнал из главного лепестка или с боков, мы обнаружили, что более 90% метеоров, дающих пригодные для обработки дифракционные картины, регистрируются главным лепестком. Исходя из этого, можно считать, что используемый метод пригоден для определения статистических зависимостей и распределений.

На рис. 3 показано распределение высот метеоров с координатами радиантов $30^\circ \leq z \leq 60^\circ$, $75^\circ \leq A \leq 105^\circ$. Основные измерения выполнены в 1968 году, только в июне представлены измерения 1969 года. Из каждой выборки, содержащей 200—400 метеоров, было отброшено 3—5% метеоров со значениями высот вне интервала 50—150 км. Исключены из рассмотрения также высоты метеоров с гиперболическими орбитами.

На протяжении всего цикла максимум распределения приходился на высоту 85—90 км. Исключение составляет распределение высот в июне с максимумом 95—100 км и в сентябре, когда почти все наблюдаемые высоты концентрируются в интервале 85—100 км.

Из рис. 3 можно отметить, что распределение высот в октябре—декабре более компактно.

Измерение скоростей на протяжении года, полученное экспериментально, не дает прямого объяснения изменению распределения высот. Очевидно, изменение высот связано с изменением других параметров метеорных тел (плотности, например).

На рис. 4 приведено распределение наблюдаемых скоростей метеоров для того же интервала наблюдений. В усреднение по каждому месяцу входило 3—4 тысячи метеоров. Интересно отметить, что в июне, сентябре и декабре распределение имеет два максимума при $V = 25—35$ и $55—60$ км/сек, причем второй максимум значительно меньше первого. Осенью распределение скоростей менее компактно, а максимум шире, чем весной. Для метеоров более ярких, до $+7^m$, распределение метеоров имеет, как правило, два максимума: при $V = 35—40$ км/сек и $55—60$ км/сек.

Теоретически распределение высот было рассмотрено Кайзером [5]

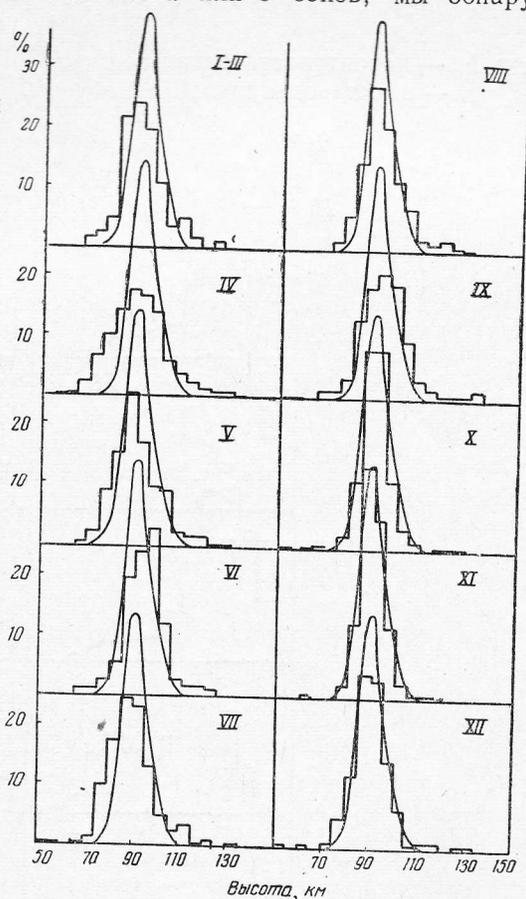


Рис. 3. Распределение высот метеоров по месяцам в 1968 г. плавная кривая — теоретическое распределение по Кайзеру.

и Бельковичем [6]. Плотность распределения высот метеоров выражена с помощью формулы Кайзера:

$$p(h) = \left(\frac{3e^t}{2e^{\frac{3}{2}t} + 1} \right)^{3(s-1)}, \quad t = \frac{h-h_0}{H},$$

где h_0 — характеристическая высота;
 H — высота однородной атмосферы.

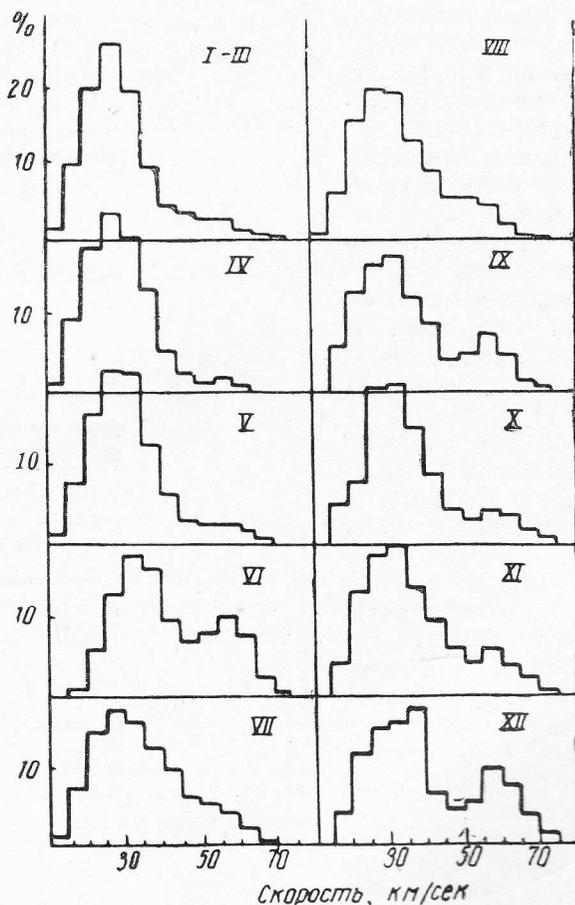


Рис. 4. Распределение скоростей метеоров по месяцам в 1968 г.

Плотность распределения высот метеоров, рассчитанная по формуле (11), нанесена на рис. 3. Теоретическое распределение высот значительно уже экспериментального. Только в октябре и ноябре оно совпадает с экспериментальным. При расчете приняты такие значения: $h_0 = 90$ км, $s = 2$.

При выводе теоретического распределения высот О. И. Бельковичем учитывалось влияние начального радиуса, изменение ионизации и начального радиуса с высотой, случайное положение зеркальной точки и изменение характеристической высоты от скорости, т. е. учитывалось распределение скоростей метеоров.

Плотность распределения высот метеоров по Бельковичу:

$$\rho(h) = \frac{h}{h_0 I H} \left[\frac{3e^t}{R^{\frac{1}{2}} (t) 2e^{\frac{3}{2}t} + 1} \right]^{3(s-1)}, \quad (12)$$

где

$$I = 2,11 \{ [1 + 0,8 (kr_0)^2] (s - 1) \}^{-0,5};$$

$$R = \left(1 + \frac{H}{h_0} t \right)^{\frac{3}{2}} \exp \{ (kr_0)^2 (e^{0,7t} - 1) \};$$

r_0 — начальный радиус на характеристической высоте.

При расчете принято, что зависимость характеристической высоты от скорости совпадает с зависимостью средней высоты от скорости, полученной экспериментально. Зависимость r_0 от высоты и скорости взята из [7]; $s = 2$.

Распределение высот по Бельковичу с учетом наблюдаемого распределения скоростей согласуется с экспериментальными результатами не лучше, чем распределение Кайзера и мало отличается от него. Это можно объяснить неприменимостью к слабым метеорам положений, на которых основывается вывод формулы Бельковича. В области слабых метеоров, например, наблюдается уменьшение высот с переходом к более мелким частицам, вместо классического увеличения. Кроме того, очень ненадежны сведения о зависимости начального радиуса от высоты и скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Радиолокационный комплекс для исследования слабых метеоров. См. статью настоящего сборника.
2. Б. Г. Бондарь, В. М. Жебко, В. В. Лизогуб, М. И. Гуртовой. Направленная коротковолновая антенна для исследования метеоров. Вестник ХПИ, № 22 (70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
3. А. З. Фрадин, И. В. Рыжков. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. Связьиздат, 1962.
4. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук. Измерение радиантов и орбит слабых метеоров. Вестник ХПИ № 36 (84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
5. T. R. Kaiser. Phil. Mag. Suppl., 2, 495, 1953.
6. О. И. Белькович. Статистическое решение некоторых задач радиолокации метеоров. Автореф. канд. дисс., Казань, 1964.
7. Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. Метеорные явления в атмосфере Земли. Изд-во «Наука», 1967.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ МЕТЕОРОВ

В. В. Жуков, Б. С. Дудник

Для детального изучения метеорных явлений и уточнения их связи с параметрами атмосферы необходимо знать высоту отражающей «точки» метеора с достаточно высокой точностью. Для этих целей в Харьковском политехническом институте изготовлен фазовый высотомер, работающий в импульсном режиме.

Направление прихода радиоволн в пространстве определяется сдвигом фаз между ЭДС, наведенных в двух взаимно-перпендикулярных парах (базах) антенн. Углы прихода радиоволн и измеряемые разности