

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТЕОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Двигаясь в межпланетном пространстве, Земля встречается на своем пути с частицами, с массами от долей грамма до нескольких десятков грамм, которые вторгаются в верхние слои атмосферы со скоростями 11 – 72 км/с. Движение частицы в атмосфере сопровождается ее значительным нагревом, плавлением, сложным механизмом разрушения, дробления и испарения. В результате соударения испарившихся молекул с атомами и молекулами атмосферы происходит возбуждение и ионизация образующихся атомов. Возбужденные атомы и ионы метеорного вещества излучают, при этом можно визуально наблюдать явление свечения метеорного следа. Протяженность метеорного следа может составлять несколько десятков километров (в среднем около 15 км.)

Метеорные следы могут также отражать волны метрового диапазона, что было положено в основу радиолокационного метода их исследований. Отраженный от метеорного следа сигнал несет в себе разнообразную информацию о характеристиках частиц и атмосферы. Так, регистрируя количество и длительность метеорных отражений, можно определить характеристики метеорного радиоканала (МРК) связи. Импульсное зондирование дает возможность определить дальность до метеорного следа. При регистрации дифракционной картины на этапе формирования следа определяется скорость движения частицы в верхних слоях атмосферы. Измерение доплеровского сдвига частоты позволяет определить радиальную скорость дрейфа метеорного следа. Применение метода регистрации с разнесенными пунктами позволяет определять радианты орбит, применение метода регистрации с несколькими базами и использование когерентной РЛС позволяет определять координаты отражающей области. Графическая интерпретация взаимосвязи результатов радиолокационных измерений с определяемыми параметрами и их практической значимостью отображена на рис. 1.

Свойство метеорных следов отражать радиоволны также применяется для метеорной радиосвязи и высокоточной синхронизации шкал эталонов времени.



Рис. 1

Процесс обработки информации, получаемой на РЛС, можно разделить на три части: предварительной, первичной и вторичной обработки. Предварительная состоит в обнаружении и выделении сигнала на фоне помех, первичная – в определении его параметров и представлении их в виде, пригодном для вторичной обработки, заключающейся в расчетах физических характеристик метеоров и траекторий движения частиц. Рассмотрим, какая информация содержится в отраженном сигнале, и как она может быть извлечена.

Информация, содержащаяся в отраженном сигнале

Мощность сигнала, отраженного от метеорного следа, представляет собой зависимость

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} f(\lambda, \alpha, r_n, \gamma, r_0), \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность передатчика; $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{пр}}$ – коэффициенты направленного действия антенн передатчика и приемника; λ – длина волны; α – линейная электронная плотность следа; r_n – наклонная дальность до отражающей точки; γ – угол между метеорным следом и лучом радиолокатора; r_0 – начальный радиус метеорного следа. (Строгие выражения для разных типов следов можно найти в [1]). Обратим внимание на то, что данная функция зависит от множества неизвестных величин: α, r_n, γ, r_0 .

Основной вклад в величину принимаемого сигнала вносит участок следа, находящийся на таком расстоянии от точки касания, в пределах которого разность хода лучей не превышает половины длины волны (рис. 2), т. е., первая зона Френеля, размеры которой определяются как

$$L_F \approx \sqrt{\frac{r\lambda}{2 \sin^2 \gamma}}. \quad (2)$$

Отражение от участков следа, образующих вторую зону Френеля (если она помещается на следе), уменьшает амплитуду принимаемого сигнала, третья зона вновь усиливает и т. д., но их влияние уменьшается с возрастанием номера. В процессе формирования следа в отражении начинают участвовать различные его области, образующие разные зоны Френеля. Это приводит к волнообразному изменению амплитуды отраженного сигнала, которое описывается амплитудно-временной характеристикой (АВХ). На рис. 3 представлена фотография АВХ одного из метеорных отражений. По ее форме можно определить одну из проекций скорости частицы, а при анализе АВХ из нескольких разнесенных пунктов все необходимые проекции и, следовательно, сам вектор скорости. Знание места расположения следа и скорости вызвавшей его частицы позволяет рассчитать координаты ее радианта.

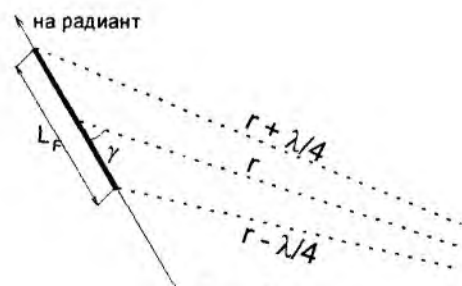


Рис. 2



Рис. 3

Электронная плотность метеорного следа α является функцией массы и плотности частицы m и ρ , скорости и угла ее вхождения в атмосферу v , а также высоты отражающей точки H_0 .

$$\alpha = f(m, \rho, v, H_0). \quad (3)$$

Начальный радиус r_0 является функцией скорости частицы и высоты отражающей точки

$$r_0 = f(v, H_0). \quad (4)$$

По мере расширения следа вследствие амбиполярной диффузии происходит постепенное уменьшение мощности отраженного сигнала. Коэффициент амбиполярной диффузии

$$D = f(H_0). \quad (5)$$

Смещение метеорного следа под воздействием ветра приводит к доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала. Его измерение позволяет найти радиальную проекцию скорости ветра.

Решение систем уравнений, основанных на зависимостях (1) – (5) (с учетом эмпирического закона распределения частиц по массам и плотностям, а также зависимости атмосферного давления от высоты) позволяет найти параметры метеорных следов и частиц, которые указаны на рис. 1. Длительные непрерывные наблюдения позволяют выявлять суточные и сезонные изменения метеорной активности и формировать базы данных о распределении метеорного вещества в Солнечной системе.

Аппаратура для радиолокационных метеорных исследований

В табл. 1 сведены параметры известных метеорных радиолокаторов.

Таблица 1

РЛС, принадлежность, город (страна), [ссылка]		Технические характеристики		Назначение	
МАРС ХНУРЭ, Харьков [2]	АССОРМИ [6]	$P = 1\text{МВт}$, $f_0 = 31,1\text{МГц}$, $\tau = 30\text{мкс}$, $F_{\text{зона}} = 500+100\text{Гц}$, Антенны: пятиэлементные волновые каналы, ориентированные на восток для АУ-1	Многоэлементные решетки из волновых каналов. Два выносных пункта	Численность, характеристики метеорных радиоотражений, радианты метеорных тел	
	Автоматический угломер[4]		Пять приемных антенн, расположенных в форме «креста»	Изучение динамических параметров атмосферы Земли в метеорной области, исследование приливов, ВГВ	
ТРОПИК ХИРЭ, (Сомали) [9]		$P = 30...40\text{кВт}$, $f_0 = 36,9\text{МГц}$, стабильность 10^{-5} , $F_{\text{зона}} = 500\text{Гц}$, $\tau_u = 40...50\text{мкс}$, выход РПУ несимметричный $Z=75\text{Ом}$, чувствительность 1мкВ . Антенны: вращающиеся 5-элементные «волновые каналы», потребляемая мощность $P=5\text{кВт}$.			Изучение притока метеорного вещества, дрейф метеорных следов в северной и южной полушарах методом доплеровских частот, т. е. «ветрового патруля» (1968 – 1970 гг.)
ВЕТА ХНУРЭ, Харьков, [3]		$P = 40\text{кВт}$, $f_0 = 36,9\text{МГц}$, $F_{\text{зона}} = 500+100\text{Гц}$, $\tau_u = 40\text{мкс}$, чувствительность 1мкВ . Антенны: 5-элементный «волновой канал», ширина ДН на уровне $3\text{дБ } 50^\circ$, СКО наклонной дальности $0,5\text{км}$.			Изучение движения воздушных потоков в атмосфере Земли на высотах $80...105\text{км}$ методом радиолокационных измерений радиальных скоростей дрейфа метеорных следов
КГУ-М5 (Казанский Гос. Университет, Казань) [8]		$P = 20\text{кВт}$, $f_0 = 32,5\text{МГц}$, $\tau_u = 100\text{мкс}$, $F_{\text{зона}} = 400\text{Гц}$, чувствительность $0,6\text{мкВ}$, Антенны: 5 вращающихся 3-элементных «волновых канала», расположены «крестом»		Исследования метеорных потоков и мониторинг движений ветра в нижней термосфере.	
SKiYMET. Индийский космический центр Vikram sarabhai, Индия, [11]		$P = 40\text{кВт}$, $f_0 = 32,25\text{МГц}$, $F_{\text{зона}} = 2144\text{Гц}$, $\tau_u = 13,2\text{мкс}$		Измерения радиальной составляющей скорости ветра на высотах $80 - 100\text{км}$.	
Национальный институт полярных исследований Суоуа, Антарктида. (Япония), [12]		$f_0 = 50\text{МГц}$. Две узконаправленные антенны. Подробное описание антенн в тексте.		Непрерывное обнаружение метеорных радиоотражений, измерение их параметров.	
RISH, Университет Киото, (Япония) [13]		$f_0 = 46,5\text{МГц}$, $P_n = 1\text{МВт}$, 25 каналный приемник, выносные пункты		Определение траектории и скорости движения метеорных частиц	

Рассмотрим их более подробно. Метеорная автоматизированная радиолокационная система (МАРС) Харьковского национального университета радиозлектроники предназначена для сбора информации о метеорных явлениях при решении астрономических, геофизических и прикладных задач. С помощью МАРС можно определять следующие данные о метеорных

телах и атмосфере Земли: время появления метеора; координаты отражающей области метеорного следа; скорость движения метеорного тела; координаты радиантов и элементы орбит метеорных тел; распределение метеорных тел по массе; радиальную составляющую скорости ветра в метеорной зоне атмосферы; распределение радиосигналов, рассеянных метеорными следами по амплитуде и длительности.

Антенны МАРС ориентированы на восток, максимум излучения под углом 45° к горизонту. Уровень бокового излучения составляет -20 дБ, уровень задних лепестков -40 дБ. Коэффициент усиления антенны 250 [2].

В 2007 г. на комплексе МАРС предпринималась попытка проверить гипотезу о сверхдальнем метеорном распространении метровых волн путем их двукратного отражения от метеорных следов и одного отражения от земной поверхности. Результаты исследований опубликованы в [5].

Для астрономических исследований предназначен комплекс АССОРМИ (автоматизированная система сбора и обработки радиометеорной информации), а для геофизических – комплекс АУ-1 (автоматический угломер). АУ-1 представляет собой пятиканальную когерентную импульсную доплеровскую метеорную РЛС. Приемные антенны АУ-1 – это пятиэлементные волновые каналы. Комплекс позволяет определять азимут, угол места, дальность и доплеровский сдвиг частоты. Передающее устройство и передающая антенна являются общими для АССОРМИ, АУ-1 и системы МАРС. Радиопередающее устройство генерирует мощные радиоимпульсы с частотой повторения $500+100$ Гц и длительностью импульса 30 мкс. Применение последовательностей 500 и 100 Гц необходимо для устранения неоднозначности при определении дальности до метеорного отражения.

Автоматический угломер (АУ), который является подсистемой МАРС, предназначен для исследования динамических параметров атмосферы Земли на высотах 80 – 105 км с возможностью выявления высотной структуры ветровых движений. На рис. 4 представлена его функциональная схема. Его приемная антенна представляет собой многошкальную измерительную систему, состоящую из пяти антенн типа волновой канал, расположенных в виде креста (рис. 5). В точке пересечения базовых линий, ориентированных по странам света, находится общая для всех баз антенна.

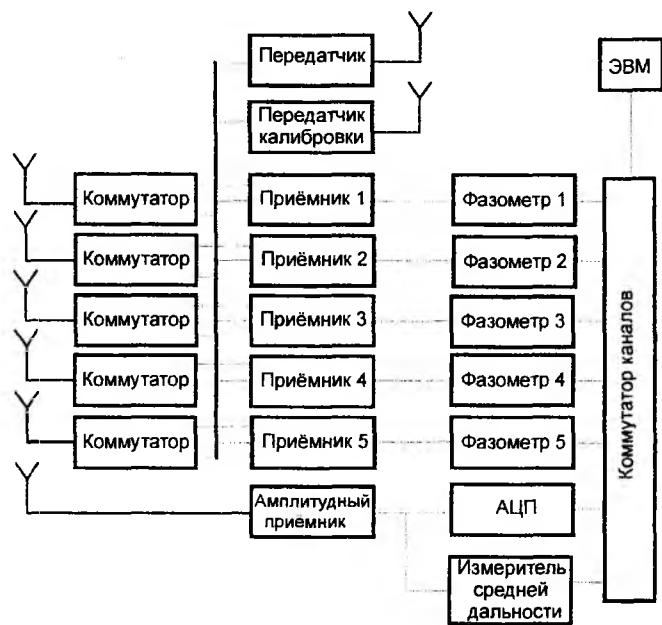


Рис. 4

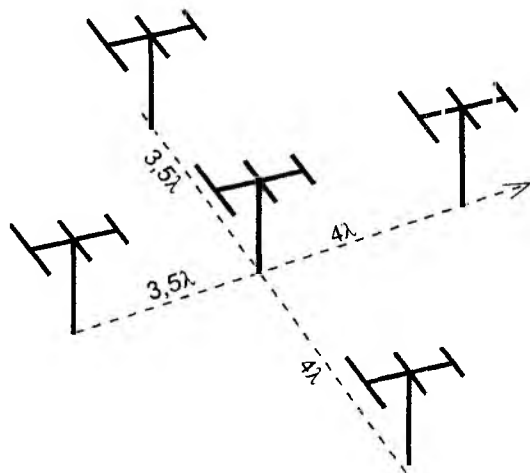


Рис. 5

Размеры антенных баз для двухшкального варианта измерительной системы выбраны из условия получения достоверной оценки угловых координат отражающей области метеорного

следа при допустимом отношении сигнал/шум. Для АУ с размерами баз $3,5\lambda$ и 4λ при допустимой погрешности измерения среднего фазового сдвига $4,5$ и вероятности аномальной ошибки $0,3\%$ среднеквадратическая погрешность измерения угловых координат отражающей точки не превышает 17 угловых минут. Осциллограмма сигнала в фазовом канале показана на рис. 9.

К антенным фидерам предъявляются жесткие требования подобия и стабильности вносимых фазовых задержек, что требует применения фазостабильных кабелей. Электрическая длина каждого антенного кабеля выбирается кратной π , так как в этом случае фазовый сдвиг, вносимый фидером, не зависит от согласования с приемником.

Измеритель средней дальности построен с использованием двухшкального метода измерения дальности и фиксацией положения импульсов по двум фронтам, что позволяет эффективно производить усреднение шумовых ошибок, однозначно определять наклонную дальность. Среднеквадратическая погрешность измерения дальности при отношении сигнал/шум 9 дБ не превышает 200 м .

Метеорная радиолокационная станция (МРЛС) ВЕТА предназначена для исследования динамических параметров атмосферы Земли на высотах $80 - 105 \text{ км}$. Структурная схема МРЛС ВЕТА приведена на рис. 6 приемная часть на рис. 7, приемно-передающие антенны на рис. 8. Антенна ВЕТА представляет собой пятиэлементный волновой канал с шириной ДН в азимутальной плоскости 54° , в угломестной 26° . Угол места максимума ДН 30° [10].

Передачик мощностью 40 кВт излучает импульсы длительность 40 мкс с частотой повторения $500 + 100 \text{ Гц}$. Приемник супергетеродинного типа с одним преобразованием частоты в амплитудном канале и с двойным в фазовом. Динамический диапазон амплитудного канала 60 дБ . Он используется для обнаружения, измерения амплитуды и задержки отраженного сигнала.

Фазовый канал предназначен для измерения скорости дрейфа метеорного следа по вариациям фазы отраженного сигнала

Представленные выше МРЛС разработаны и созданы силами ученых и инженеров коллектива кафедры Основ радиотехники ХНУРЭ под руководством проф. Б. Л. Кашеева. Они расположены на Балаклейском научно-исследовательском полигоне ХНУРЭ, который является национальным научным достоянием Украины.

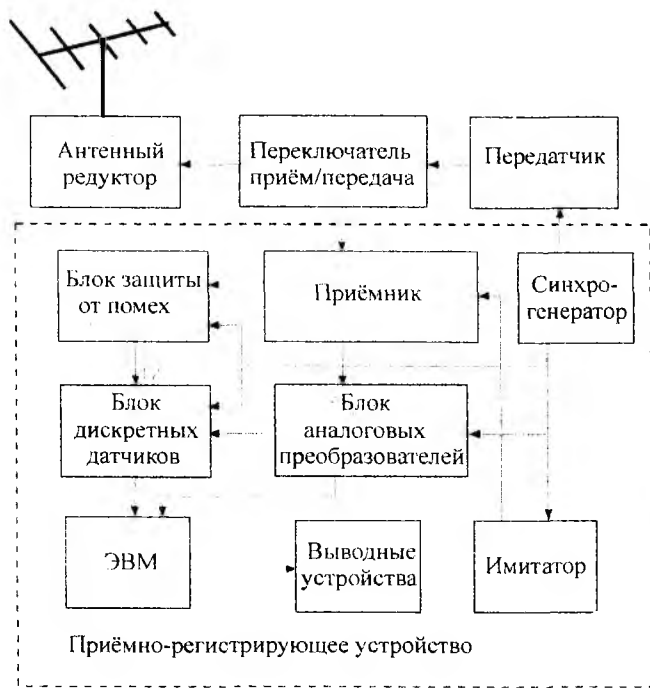


Рис. 6

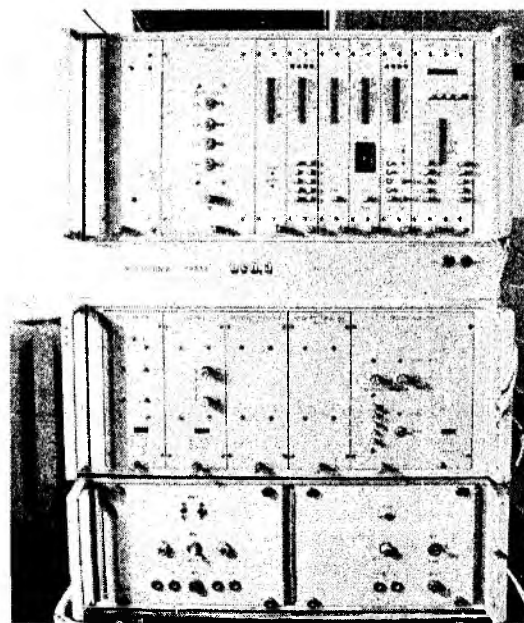


Рис. 7

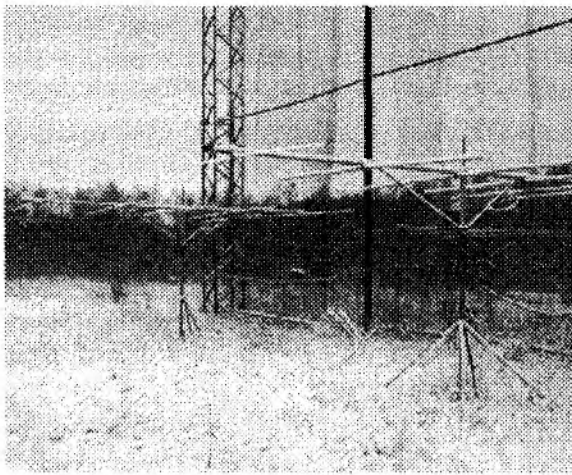


Рис. 8

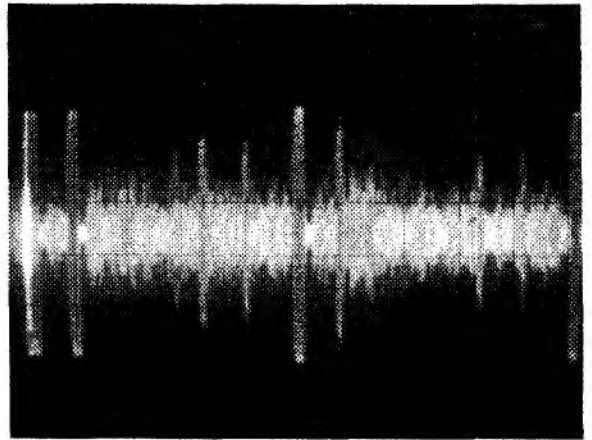


Рис. 9

За всю историю радиометеорных наблюдений в Харькове, аппаратура претерпела ряд усовершенствований и модернизаций. Регулярные измерения численности метеоров начались с 1957 г., во время Международного геофизического года (1957 – 1959 гг.). Огромное количество регистраций выполнено фотометодом, что снижает скорость обработки данных. По мере развития элементной базы и средств вычислительной техники были внедрены новые технологии, позволившие получать результаты на более высоком уровне.

Отметим, что в мире существует несколько метеорных радиолокационных станций.

Метеорный радар Казанского государственного университета КГУ-М5 входит в международную сеть радиосредств исследований динамики верхней атмосферы и является единственным в России. Он служит для исследования метеорных потоков и мониторинга движений ветра в нижней термосфере [8]. В нем реализован дискретный квазитомографический метод измерения радиантов и скоростей метеорных потоков по угломерным данным и дифракционным измерениям скоростей метеоров.

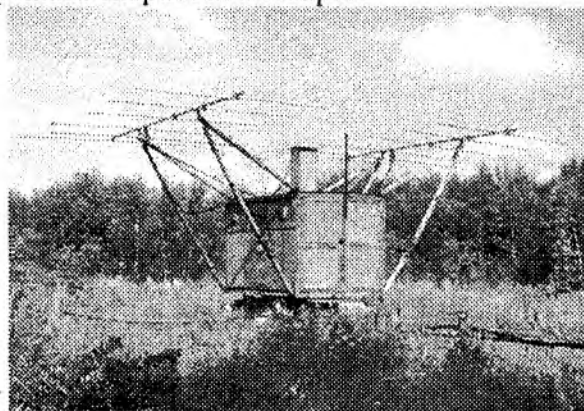


Рис. 10

В состав комплекса входят: антенная система передатчика, состоящая из двух синфазных пятиэлементных антенн «волновой канал» с высотой подвеса $\lambda/4$ (рис. 10). Антенны установлены на вращающемся основании для установки в четырех направлениях, ориентированных по странам света. Антенная система приемного канала включает в себя пять вращающихся по азимуту 3-элементных антенн типа «волновой канал», с высотой подвеса $\lambda/4$, расположенных «крестом», также ориентированным по странам света. Другие технические характеристики КГУ-5М приведены в табл. 1.

По материалам [11] с июня 2004 г в Индийском космическом центре Vikram sarabhai работает метеорный ветровой радар SKiYMET. Его технические характеристики также представлены в табл. 1. РЛС предназначена для измерения радиальной составляющей скорости ветра на высотах метеорной области атмосферы (80 – 100 км). Вертикальная составляющая скорости ветра при анализе игнорируется. Для исследований горизонтального ветра используются данные за каждый час с высотным разрешением 3 км. Результаты измерений зональных и меридиональных скоростей усредняются за каждый час наблюдений для каждой высоты и представляются в форме композитного суточного цикла за месяц. Такой композитный цикл обеспечивает хорошее описание приливной структуры за определенный месяц. Он мо-

жет в дальнейшем подвергаться Фурье анализу для получения высотной структуры амплитуд и фаз приливных компонентов.

Национальным институтом полярных исследований (Токио, Япония) на антарктической станции Syowa (69° ю. ш., 39° в. д.) в 1982 г. был установлен доплеровский радар, предназначенный для обнаружения метеорных радиоотражений. Рабочая частота радара 50 МГц, его антенная система формировала два узких луча (4° в горизонтальной плоскости), причем один из них направлен к южному магнитному полюсу, а другой – к южному географическому полюсу (угол между лучами 33°). Управление радаром и регистрацию данных осуществляла ЭВМ. Длительность регистрируемых сигналов составляла до 1 с дискретностью 10 мкс. По полученным данным определялась постоянная времени рассеяния следа, которая использовалась для расчета коэффициента амбиполярной диффузии и высоты отражающей точки [12].

Также имеется информация о том, что для исследования метеоров успешно применялся MU радар RISH (Университет Киото, Япония). Он является MST радаром (мезосфера – стратосфера – тропосфера), предназначенным для вертикального зондирования атмосферы, его технические характеристики представлены в табл. 1. Радар оснащен 25 канальным цифровым приемником, что значительно улучшает чувствительность и точность интерферометра, используемого при наблюдении метеоров. Регистрация осуществляется совместно с двумя выносными пунктами, синхронизированными посредством GPS, что дает возможность определять траекторию и скорость движения метеорных частиц [13].

Можно также отметить метеорные исследования, проводившиеся в Астрономическом Институте Академии Наук Чешской Республики [14]. Однако сведений о технических характеристиках применявшихся РЛС нет.

Сделанный анализ и обзор существующих метеорных РЛС и их возможностей, показывает, что актуальность решаемых ими научных и практических задач остается весьма значительной. Не исключено и возникновение новых задач. Так в Московском военном институте радиоэлектроники космических войск предложено использовать радиолокаторы в целях изучения размеров космического мусора и оценки расстояний его до космических аппаратов [8].

Ставшая популярной в последнее время полуактивная локация метеорных следов [5], использующая радиоизлучение сторонних передатчиков, безусловно, обладает рядом достоинств. Отсутствие мощного радиопередатчика в месте измерений упрощает их проведение, как технически, так и организационно. Но пространственные координаты метеорного следа или направление движения частицы полуактивным методом установить чрезвычайно сложно. Поэтому наиболее информативным методом изучения метеорных явлений остается активная радиолокация, а значит задача совершенствования ее средств и методов не теряет своей актуальности.

Пути совершенствования средств и методов метеорных радиолокационных наблюдений

Выбирая пути совершенствования средств и методов метеорных исследований, можно выделить инженерно-техническое и научное направление. К первому следует отнести:

- снижение энергопотребления радиопередатчиками и аппаратурой в целом;
- переход на цифровые методы обработки и хранения информации;
- автоматизация процесса измерений и доставки информации с выносных пунктов;
- совершенствование средств измерения и контроля характеристик аппаратуры;
- повышение надежности аппаратуры за счет применения современной элементной базы.

Научное направление должно включать в себя разработку модели метеора как радиолокационной цели, моделирование процесса излучения, отражения и приема радиолокационных сигналов, а также моделирование первичной и вторичной обработки радиолокационной информации. На основании моделирования можно выработать рекомендации:

- по оптимизации излучаемой мощности, ориентации антенн, формы их ДН;
- целесообразности применения сложных сигналов, рекомендации по видам сложных сигналов;

- возможности применения двухчастотного (многочастотного) зондирования;
- оптимизации размещения выносных пунктов;
- оптимизации процесса первичной обработки результатов наблюдений,
- разработке новых алгоритмов первичной и вторичной обработки.

Список литературы: 1. Б. Л. Кащеев, Б. Г. Бондарь, В. И. Горбач, Ю. А. Коваль. Метеоры сегодня. Киев: Техніка. 1996. 196 с. 2. Дистанционные методы исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кащеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 416 с. 3. Олейников А. Н., Лизогуб В. В. Аппаратура для радионаблюдений дрейфа метеорных следов Харьковского института радиоэлектроники // Глобальная система метеорных наблюдений. М.: 1987. С. 23 – 31. 4. Б. Л. Кащеев, В. В. Жуков. Автоматический угломер. Сообщение 1. Принципы построения // Радиотехника. Вып. 47. Харьков, 1978. С. 3-9. 5. Антипов И. Е. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации: Дис. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2007. 306 с. 6. Б. Г. Бондарь, А. А. Ткачук, Б. С. Дудник. Передающее и антенное устройство станции высокой эффективной чувствительности // Вестник ХПИ №22 (70). Радиотехника. 1967. Вып.1. 7. Макаров В. А., Нестеров В. Ю., Путьшев Ю. А. и др. Радиолокационный комплекс КГУ-М5 для измерения координат отражающих точек на метеорном следе // Метеорное распространение радиоволн. Казань: Изд-во КГУ, 1981. Вып. 17. С. 96–100. 8. В. А. Леонов, А. О. Жуков, А. Н. Харченко. Использование оптических средств поддержки радиолокационных систем наблюдения метеоров в целях изучения космического мусора // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 5. 9. РПУ «ТРОПИК», Техническое описание, инструкция по эксплуатации. ХИРЭ, 1972 г. 10. Ветровой автомат «ВЕТА-4». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, ХИРЭ, 1990 г. 11. http://cdaw.gsfc.nasa.gov/publications/ilws_goa2006/440_kumar.pdf. 12. http://adsabs.harvard.edu/physics_service.html. 13. <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/radar-group/labinfo/MUR-e.html> 14. <http://www.aanda.org/>

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 10.01.2009