

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ 80-105 КМ ПО СИГНАЛАМ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

Введение

Метод радиолокации метеорных следов – одно из основных средств для мониторинга ветровых движений на высотах мезопаузы – нижней термосферы (МНТ, 80 – 105 км) [1, 2]. Принцип измерения скорости ветра основан на регистрации доплеровского сдвига частоты отраженных от метеорных следов зондирующих сигналов метеорной РЛС. Эти РЛС излучают специализированный зондирующий сигнал мощностью от единиц киловатт и позволяют определять координаты отражающих областей метеорных следов (угол места ϵ , азимут ϕ , высоту h) и их скорости дрейфа вдоль направления зондирования [3, 4]. В [5–7] показано, что для радионаблюдений за метеорными следами могут быть использованы также сигналы телевизионного вещания (СТВ). Перспективность использования СТВ для наблюдения за метеорными следами обусловлена тем, что для этого не требуется излучать специализированный зондирующий сигнал. Это позволяет сократить эксплуатационную стоимость подобных устройств за счет значительного снижения энергопотребления, стоимости регламентных работ и отсутствия арендной платы за использование радиочастотного ресурса.

Цель работы – дальнейшее развитие работ [5–7] – теоретическое и экспериментальное исследование возможности использования СТВ для измерения скорости ветра на высотах МНТ методом радиолокации метеорных следов. Такое применение СТВ исследуется впервые в рамках данного научно-исследовательского направления.

1. Особенности измерения скорости ветра методом радиолокации метеорных следов по сигналам телевизионного вещания

Радиотехническая система, реализующая измерения скорости ветра на высотах мезопаузы – нижней термосферы (МНТ) методом радиолокации метеорных следов по сигналам телевизионного вещания (СТВ), относится к классу разнесенных (многопозиционных) РЛС. Это вызвано тем, что расстояние между приемной позицией и источником зондирующих сигналов (телевизионным радиопередатчиком, ТВ РПУ) сравнимо или превышает дальность до цели (метеорного следа).

В рамках данного разд.1 предположим, что координаты ТВ РПУ априорно известны. На практике это условие не всегда выполняется из-за большого числа радиопередатчиков одного телевизионного радиоканала, сигналы которых могут быть приняты посредством отражения от метеорных следов. В разд. 2 предложена методика идентификации ТВ РПУ, который излучил принятый отраженный сигнал.

Доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ, F_d) для разнесенных (многопозиционных) РЛС может быть рассчитан как [8, 9]:

$$F_d = \frac{1}{\lambda} \cdot \vec{V} \cdot (\vec{r}_1 + \vec{r}_2) = \frac{1}{\lambda} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{r}_1 + \vec{V} \cdot \vec{r}_2), \quad (1)$$

где F_d – доплеровский сдвиг несущей частоты зондирующего сигнала; \vec{V} – вектор скорости цели (дрейфа отражающей области метеорного следа); \vec{r}_1 , \vec{r}_2 – орты в направлении от метеорного следа к приемной и передающей позициям; $\lambda = c/f_0$ – длина волны зондирующего сигнала; f_0 – несущая частота зондирующего сигнала; c – скорость света.

Согласно формуле (1) и рис. 1 ДСЧ зондирующего сигнала, излученного в точке В и принятого в точке С, определяется суммой скалярных произведений $\vec{V} \cdot \vec{r}_1$ и $\vec{V} \cdot \vec{r}_2$, или, другими словами, двумя проекциями вектора скорости дрейфа метеорного следа на трассу распространения зондирующего сигнала (отрезки АВ и АС).

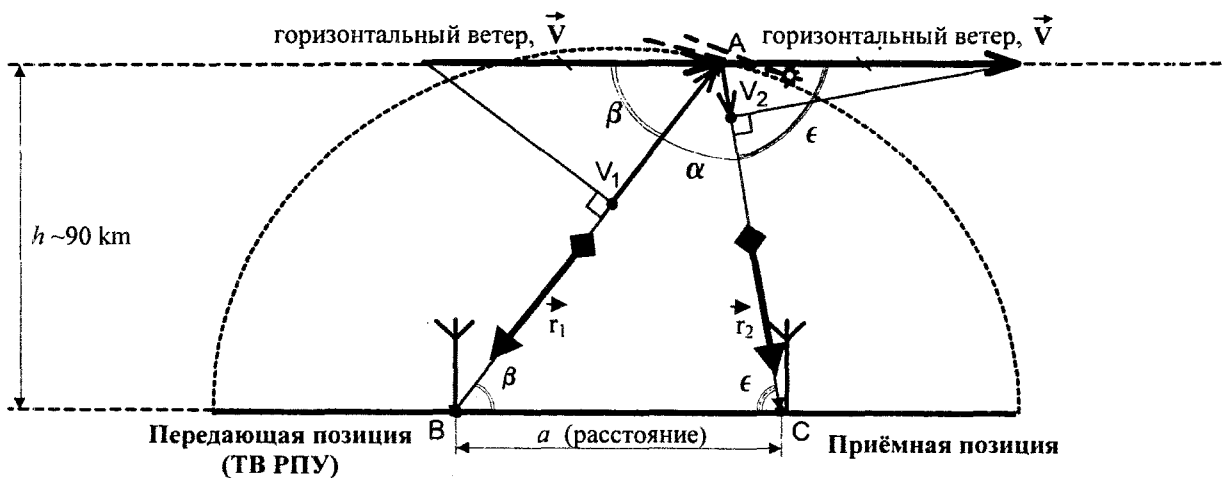


Рис. 1

При постоянном направлении и величине вектора \vec{V} ДСЧ отраженного сигнала будет различным для метеорных следов с различными высотой h , азимутом ϕ и углом места ϵ относительно приемной или передающей позиции.

На рис. 2 приведены зависимости величины $D = \frac{F_d}{|\vec{V}|}$ от ϵ метеорного следа относительно

приемной позиции. Величина D характеризует ДСЧ отраженного от метеорного следа сигнала относительно модуля вектора скорости дрейфа следа. Зависимости на рис. 2 рассчитаны по формуле (1) для следующих частных случаев:

1) "Продольный" дрейф метеорного следа в "продольной" плоскости ($D_{||}$, рис. 2, а). Определим продольную плоскость как плоскость, которая содержит приемную и передающую позиции и которая ортогональна поверхности Земли. В случае если передающая позиция расположена на Востоке или на Западе относительно приемной позиции, тогда "продольная" компонента соответствует зональной компоненте скорости дрейфа метеорного следа. Направление дрейфа метеорного следа – от передающей позиции к приемной;

2) "Поперечный" дрейф метеорного следа в "поперечной" плоскости, содержащей приемную позицию (D_{\perp} , рис. 2, б). "Поперечной" является такая плоскость, которая ортогональна "продольной" плоскости и поверхности Земли. При расположении передающей позиции на Востоке или на Западе относительно приемной позиции "поперечная" компонента соответствует меридиональной компоненте скорости дрейфа метеорного следа.

Следует обратить внимание, что $D_{||}$ и D_{\perp} характеризуют дрейф метеорного следа относительно приемной и передающей позиций независимо от его ориентации в пространстве.

Расчет частных случаев 1,2 выполнен в предположении горизонтальности ветровых движений в МНТ [3, 4], с учетом кривизны поверхности Земли, для постоянной величины модуля скорости дрейфа метеорного следа в $|\vec{V}| = 1 \text{ м/с}$ на высоте в $h = 90 \text{ км}$ для различных a . Несущая частота зондирующего сигнала соответствует номинальной величине несущей частоты сигнала изображения второго телевизионного радиоканала, [10], $f_0 = 59,25 \text{ МГц}$.

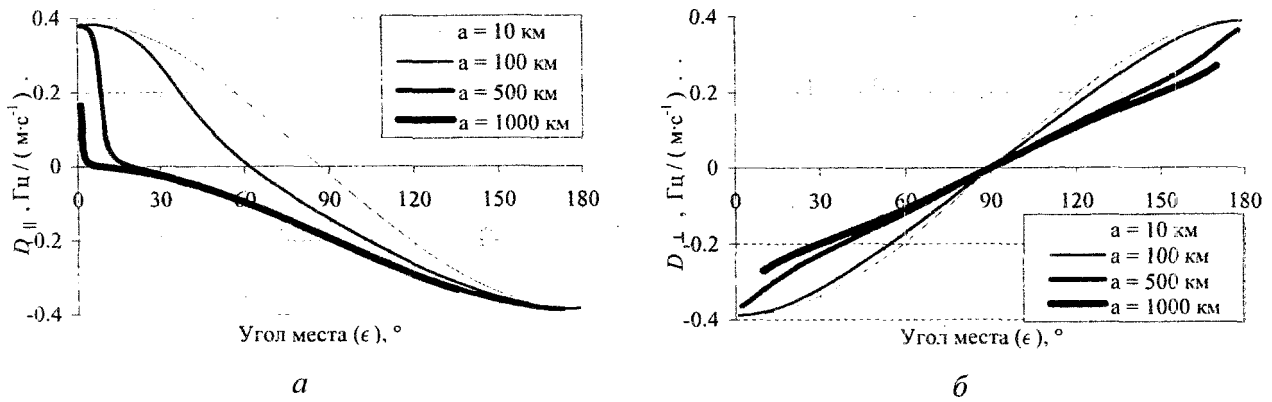


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что ДСЧ одинакового порядка могут быть обусловлены "продольным" и "поперечным" дрейфом метеорного следа. Причем в зависимости от величины ϵ одна и та же компонента дрейфа метеорного следа может вызывать как положительные, так и отрицательные ДСЧ отраженных сигналов. При определенных ϵ возможны случаи, когда ДСЧ не зависит от продольной или поперечной компонент скорости дрейфа следа (для величин ϵ таких, что $D_{||}(\epsilon) = 0$ или $D_{\perp}(\epsilon) = 0$, см. рис. 2). Следовательно, по одной только величине ДСЧ отраженного сигнала невозможно однозначно выделить и оценить величину какой-либо компоненты скорости дрейфа метеорного следа ("продольной" или "поперечной").

Для решения задачи однозначности измерений и выделения определенной компоненты скорости дрейфа метеорного следа введем коэффициент селекции "продольной" компоненты:

$$S_{||} = \frac{|D_{||}|}{|D_{||}| + |D_{\perp}|}.$$

Коэффициент селекции $S_{||}$ показывает вклад доплеровского сдвига из-за продольной компоненты дрейфа метеорного следа в общий доплеровский сдвиг несущей частоты отраженного сигнала. Значения $S_{||}$, близкие к единице, показывают, что для соответствующих ϕ и ϵ метеорного следа ДСЧ отраженного сигнала определяется только продольной компонентой скорости дрейфа метеорного следа и слабо зависит от поперечной компоненты. Значения $S_{||}$ близкие к 0 показывают, наоборот, что ДСЧ определяется только поперечной компонентой.

На рис. 3 приведена поверхность значений $S_{||}$ для различных ϕ , ϵ метеорного следа при удалении передающей позиции $a = 500$ км на Запад (величины ϕ , ϵ , a приведены относительно приемной позиции). Из рис. 3 следует, что область максимального значения $S_{||}$ соответствует метеорным следам с углами места ϵ , близкими к 90° или находящимся на направлении, противоположном передающей позиции.

Для селекции ДСЧ, вызванного "продольным" дрейфом метеорного следа, и измерения соответствующей компоненты скорости ветра следует использовать только сигналы, отраженные от метеорных следов, которые находятся над приемной позицией и в направлении, противоположном передающей позиции (см. рис. 3, область максимальных значений $S_{||}$), [11]. При $a = 100 - 700$ км размеры области максимальных значений $S_{||}$ таковы, что диапазон углов места $90^\circ \pm 30^\circ$ соответствует уровню $S_{||}$ не менее 0,7 от максимального значения, диапазон углов места $90^\circ \pm 45^\circ$ – уровню $S_{||}$ не менее 0,5. Такую пространственную селекцию метеорных следов над приемной позицией можно реализовать с помощью антенны с вертикальной ориентацией максимума диаграммы направленности. При этом ширина диаграммы направленности должна составлять не более $60 - 90^\circ$, что является конструктивно реализуемым требованием для антенн данного частотного диапазона.

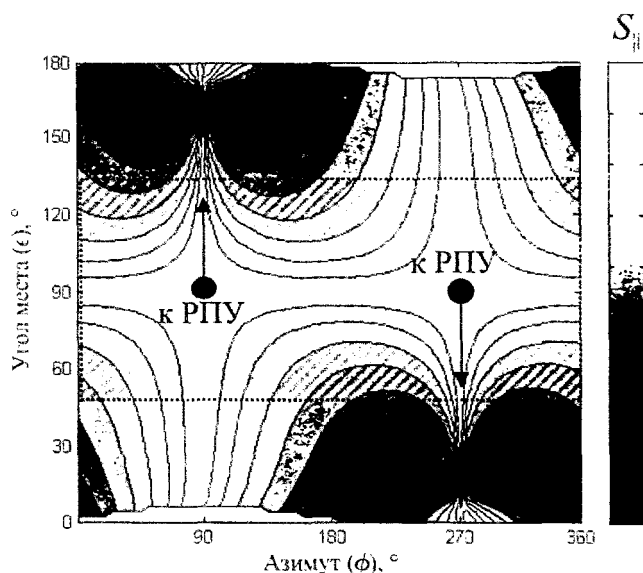


Рис. 3

При увеличении расстояния между приемной и передающей позициями размер области максимального значения $S_{||}$ увеличивается, однако с увеличением a возрастает вероятность экранирования трассы распространения зондирующего сигнала сферической поверхностью Земли. Это ограничивает диапазон возможных значений ϕ и ϵ метеорных следов, от которых может быть принят отраженный сигнал. Такое влияние поверхности Земли может проявляться и при $a = 500 - 700$ км при отсутствии атмосферной рефракции для метеорных следов с $\epsilon > 170^\circ$ ($\epsilon < 10^\circ$ в противоположном РПУ направлении), см. рис. 3.

Также следует заметить, что в области над приемной позицией в пределах $\epsilon = 90^\circ \pm 45^\circ$ $D_{||}$ имеет постоянный знак, а D_{\perp} имеет противоположные знаки для $\epsilon > 90^\circ$ и $\epsilon < 90^\circ$ (см. рис. 2). Следовательно, в предположение симметричного закона распределения ϵ метеорных следов над приемной позицией в пределах указанной области, средняя величина D_{\perp} , вычисленная по некоторому множеству отраженных сигналов, будет стремиться к 0, в отличие от средней величины $D_{||}$. Тогда коэффициент $S_{||}$, вычисленный по средним значениям $D_{||}$ и D_{\perp} будет превосходить коэффициент селекции, вычисленный по единичным значениям $D_{||}$ и D_{\perp} . Анализ средних величин ДСЧ сигналов, отраженных от метеорных следов над приемной позицией, позволит с большей точностью оценивать величину продольной составляющей скорости ветра по сравнению с оценками по единичным значениям. Степень такого увеличения будет определяться реальным законом распределения метеорных следов по углу места ϵ в приемной позиции.

С практической точки зрения прием отраженных от метеорных следов сигналов с вертикального направления обладает следующим преимуществом: при вертикальной ориентации максимума диаграммы направленности антенны в приемной позиции исключается прием сигналов, распространяющихся земной волной. Это могут быть сигналы от передающей позиции и от окрестных близлежащих радиисточников на близких (в пределах октавы) радиочастотах. Такие сигналы за счет большой мощности могут являться причиной интермодуляционных помех и маскировать отраженные от метеорных следов сигналы.

Также вертикальное направление приемной антенны создает равные условия для приема отраженных от метеорных следов сигналов, которые излучены различными РПУ на различных азимутах относительно приемной позиции. Каждой паре "приемная позиция" – РПУ соответствует свое направление измеряемой "продольной" компоненты скорости дрейфа метеорного следа. Это направление определяется азимутом на РПУ в приемной позиции. Тогда, принимая сигналы от различных РПУ, что, к примеру, может быть реализовано при использовании СТВ от существующей сети ТВ РПУ, создается возможность измерения различных компонент скорости ветра для одной и той же области пространства. Это позволяет определить вектора скорости ветра в МНТ по результатам измерений.

2. Сигналы телевизионного вещания второго радиоканала для измерения скорости ветра в МНТ над г. Харьков

Непосредственно в г. Харьков отсутствуют ТВ РПУ второго радиоканала. Это создает условия для приема сигналов от удаленных ТВ РПУ второго радиоканала (см. таблицу) за счет их переотражения от метеорных следов [12, 13]. Следует отметить, что прием отражен-

ных от метеорных следов СТВ не всегда возможен в условиях реальной помеховой обстановки, наличия мощных радиопередающих устройств на близких радиочастотах (в пределах октавы) и возможности дальнего тропосферного распространения сигналов от удаленных ТВ РПУ [12].

Расположение и несущие частоты радиосигнала изображения источников отраженных от метеорных следов СТВ второго радиоканала (для г. Харьков, Украина)

Наименование населенного пункта	Азимут и расстояние (отн. г. Харьков)	Рабочая частота, МГц и СНЧ (округл. до 0,1 кГц)	Мощность, кВт
Киев	279°; 414 км	59,25; (0 кГц)	340
Старый Оскол	38°; 173 км	59,239583; (-10,4 кГц)	20
Дубки	14°; 865 км	59,239583; (-10,4 кГц)	113
Борисоглебск	40°; 436 км	59,260417; (+10,4 кГц)	40
Bălți	251°; 656 км	59,239583; (-10,4 кГц)	109
Брянск	36°; 380 км	59,260417; (+10,4 кГц)	36
Вильнюс	309°; 907 км	59,253906; (+3,9 кГц)	177
Краснодар	159°; 593 км	59,244792; (-5,2 кГц)	27

Для измерения скорости дрейфа метеорного следа по отраженному от него СТВ необходимо идентифицировать источник принятого сигнала (ТВ РПУ) и определить его азимут относительно приемной позиции.

Идентификация источника принятого СТВ может быть выполнена по значению его несущей частоты. Величина несущей частоты СТВ (f_0), излученного конкретным ТВ РПУ (рабочая частота ТВ РПУ) – это сумма номинальной частоты несущей (постоянная для всех ТВ РПУ одного радиоканала) и смещения несущей частоты (СНЧ). Величины СНЧ заданы индивидуально для каждого ТВ РПУ при планировании сети вещательного телевидения. Возможные значения СНЧ строго определены в нормативных документах [10] и имеют порядок единиц-десятков килогерц.

Таким образом, оценка величины несущей частоты отраженного от метеорного следа СТВ позволяет получать следующую информацию [11]:

1. Грубая оценка частоты (с точностью до килогерца) позволяет идентифицировать источник сигнала. Однозначная идентификация не всегда возможна, так как некоторые ТВ РПУ имеют одинаковые рабочие частоты (одинаковые СНЧ), см. таблицу. Это позволяет значительно сократить список возможных источников принятого СТВ.

2. Точная оценка частоты (с точностью до герца) и ее отклонение от значения рабочей частоты ТВ РПУ позволяет оценить ДСЧ, вызванный дрейфом метеорного следа вдоль направления приемная позиция – конкретный (предполагаемый) ТВ РПУ.

Средняя длительность радиосигнала, отраженного от метеорного следа, составляет 0,1 с (до 2 с) [1–4]. Стабильность несущей частоты СТВ на этом временном интервале не регламентируется в соответствующих нормативных документах [10, 14]. Однако этот параметр является ключевым при оценке возможности использования СТВ для измерения скорости дрейфа метеорных следов.

В [15] приведены результаты экспериментальной оценки $\delta_{изл}$ – среднего квадратического отклонения (СКО) несущих частот СТВ (радиосигнала изображения) от конкретных ТВ РПУ. Структура измерительной установки аналогична используемой ниже (см. разд. 3). Измерения были проведены по "прямым" сигналам ТВ РПУ г. Старый Оскол (второй радиоканал) и г. Харьков (третий радиоканал). Время измерения (усреднения) $\tau_{изм}$ выбиралось равным среднестатистическому времени существования метеорного следа (0,1 с) и более. Экспериментально получено, что $\delta_{изл}$ составляет 2 Гц ($\tau_{изм} = 0,1$ с); 0,3 Гц ($\tau_{изм} = 10$ с); 1 Гц ($\tau_{изм} = 24$ ч). Полученные величины $\delta_{изл}$ не превышают типовых величин погрешности при измерении доплеровского смещения отраженного сигнала, вызванного дрейфом метеорного следа. Следовательно, несущая частота радиосигнала изображения обладает достаточной стабильностью для оценки ДСЧ сигнала телевизионного вещания.

3. Устройство для экспериментального исследования способа измерения скорости ветра на высотах МНТ методом радиолокации метеорных следов по сигналам телевизионного вещания

Для проведения экспериментальных исследований использовалось устройство, которое состоит из приемной антенны, специализированного радиоприемного устройства (РПрУ), стандартных аналого-цифрового преобразователя (АЦП), источника опорных частот и ЭВМ для цифровой обработки сигналов [16]. Используемая приемная антенна – трехэлементный волновой канал. Траверса антенны расположена вертикально; директор, вибратор, рефлектор расположены горизонтально в меридиональной плоскости; расстояние от рефлектора до поверхности "земли" составляло 40 см. Максимум диаграммы направленности приемной антенны направлен вертикально. Ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ составляет 90°, КСВ в фидере не более 1,9 в полосе 1 МГц относительно номинальной величины f_0 радиосигнала изображения второго радиоканала (59,25 МГц) (по результатам моделирования в программе MMANA). Антенна с такими характеристиками используется для приема и селекции СТВ второго радиоканала, отраженных от метеорных следов в области над приемной позицией. Это отвечает требованиям селекции ДСЧ, которое вызвано "продольной" компонентой скорости дрейфа метеорного следа (или скорости ветра на высотах МНТ), см. выше.

РПрУ супергетеродинного типа с однократным преобразованием частоты. РПрУ имеет выходы амплитудного ограничителя (для оценки несущей частоты принятого сигнала) и амплитудного детектора (для оценки мощности принятого сигнала). Рабочая частота РПрУ – фиксированная. Возможные значения рабочих частот соответствуют номинальным значениям несущих частот радиосигнала изображения первого-третьего телевизионных радиоканалов (49,75 МГц; 59,25 МГц; 77,25 МГц), [10]. Промежуточная частота (ПЧ) РПрУ 6,5 МГц, ширина полосы пропускания тракта ПЧ 160 кГц, избирательность по соседнему каналу в тракте ПЧ 40 дБ, избирательность по соседнему и зеркальному каналам в радиочастотном тракте не менее 60 дБ. Высокая избирательность в радиочастотном тракте необходима для приема отраженных от метеорных следов сигналов в условиях реальной помеховой обстановки и пределах города и обеспечивается применением в качестве преселектора фильтра на спиральных резонаторах [17]. Чувствительность РПрУ по антенному входу не хуже 1 мкВ (при соотношении сигнал/шум на выходе равном двум).

Источник опорных частот используется для формирования гетеродинного напряжения и тактирования АЦП. Нестабильность используемого источника опорных частот (тип прибора: "Синтезатор частот" Ч6-31) составляет $5 \cdot 10^{-10}$ за 10 с; $5 \cdot 10^{-8}$ за 24 ч; $5 \cdot 10^{-7}$ за 6 мес (с включением/выключением), погрешность установки частоты $5 \cdot 10^{-8}$.

Серия контрольно-испытательных измерений показала, что данное устройство позволяет оценивать частоту радиосигнала с уровнем в единицы микровольт за время измерения в 0,1 с с СКО оценок частоты в единицы герц. Ожидаемый ДСЧ несущей СТВ при отражении от метеорных следов значительно превосходит эту величину СКО и составляет 20 – 40 Гц (для метеорных следов со скоростями дрейфа до 150 м/с [1, 2] в диапазоне углов места относительно приемной позиции $\epsilon = 90^\circ \pm 45^\circ$). Следовательно, характеристики данного устройства достаточны для выявления ДСЧ несущей СТВ, отраженных от дрейфующих метеорных следов.

4. Результаты экспериментальных исследований способа измерения скорости ветра на высотах МНТ методом радиолокации метеорных следов по сигналам телевизионного вещания

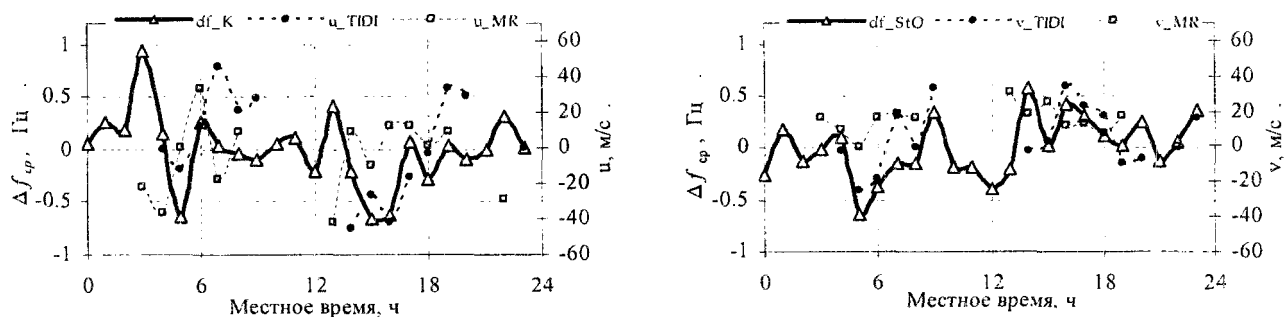
В Харьковском национальном университете радиотехники (50°N; 36,2°E) с помощью описанного выше устройства были проведены четыре серии непрерывных экспериментальных исследований отраженных от метеорных следов СТВ второго радиоканала ($f_0 = 59,25$ МГц). Даты проведения измерений: 01...03; 12...14; 16...19; 21...23 апреля 2010.

За цикл измерений было принято свыше 7,5 тыс. сигналов, идентифицированных как отраженные от метеорных следов СТВ. Распределение несущих частот принятых сигналов

имеет линейчатый вид в пределах полосы 120 кГц относительно частоты $59,25 \text{ МГц}$ (номинальная величина несущей частоты радиосигнала изображения второго телевизионного радиоканала, [10]). Максимумы в распределении соответствуют рабочим частотам конкретных ТВ РПУ, сигналы которых могут быть приняты в г. Харьков посредством отражения от метеорных следов (см. таблицу). Общая численность сигналов, обнаруженных на каждой конкретной радиочастоте, различна и определяется мощностью и расстоянием до ТВ РПУ с соответствующим значением рабочей частоты. Суточный ход численности обнаруженных отраженных от метеорных следов СТВ и вид огибающей отраженных сигналов согласуются с известными закономерностями [1–4].

Ширина распределения несущих частот отраженных от метеорных следов СТВ в окрестности рабочих частот конкретных ТВ РПУ превышает более чем в три раза СКО величины несущей частоты СТВ, излученного ТВ РПУ до отражения от метеорного следа. Отклонения несущей частоты отраженных от метеорных следов сигналов относительно рабочей частоты соответствующих ТВ РПУ Δf достигали 40 Гц , в то время как СКО величины несущей частоты СТВ до отражения от метеорного следа составляет 2 Гц . Приведенные величины СКО получены при одинаковом времени измерения в $0,1 \text{ с}$.

Рассчитанный по СТВ от различных ТВ РПУ осредненный суточный ход среднечасовых отклонений несущей частоты отраженных от метеорных следов сигналов $\Delta f_{\text{ср}}$, имеет различный вид (см. рис. 4). Следует отметить, что перед расчетом $\Delta f_{\text{ср}}$ ряды Δf были ограничены полосой в 10 Гц относительно рабочей частоты предполагаемого источника СТВ для приведения их закона распределения к одномодальному виду. Для расчета каждой величины $\Delta f_{\text{ср}}$ использовано от 32 до 100 измеренных величин Δf по СТВ на рабочей частоте ТВ РПУ в г. Киев. Для СТВ на рабочей частоте ТВ РПУ в г. Старый Оскол, Дубки, Bălți количество величин Δf для расчета $\Delta f_{\text{ср}}$ составляло от 15 до 80.



- df_K – осредненная суточная вариация $\Delta f_{\text{ср}}$ по сигналам от ТВ РПУ с рабочей частотой $59,25 \text{ МГц}$. Расположение ТВ РПУ: г. Киев (см. таблицу);
- df_{StO} – осредненная суточная вариация $\Delta f_{\text{ср}}$ по сигналам от ТВ РПУ с рабочей частотой $59,239583 \text{ МГц}$ (СНЧ $\sim -10,4 \text{ кГц}$). Расположение ТВ РПУ: г. Старый Оскол, г. Дубки, г. Bălți;
- $u_{\text{TIDI}}/v_{\text{TIDI}}$ – осредненная суточная вариация зональной/меридиональной компонент скорости ветра на высотах $87,5\text{--}92,5 \text{ км}$ по данным спутника TIMED;
- $u_{\text{MR}}/v_{\text{MR}}$ – осредненная суточная вариация зональной/меридиональной компонент скорости ветра на высотах $87,5\text{--}92,5 \text{ км}$ по данным метеорной РЛС и обсерватории Collm.

Рис. 4

Если наблюдаемые вариации Δf и $\Delta f_{\text{ср}}$ вызваны эффектом Доплера при отражении от метеорных следов, то вариация этих отклонений должна коррелировать с вариацией продольной компоненты средней скорости ветра в метеорной зоне (распределение высот метеорных следов имеет "квази" Гауссов закон распределения с максимумом в области $87,5\text{--}92,5 \text{ км}$ [3, 18]). При этом направление продольной компоненты скорости ветра должно определяться азимутом на предполагаемый источник принятых СТВ.

Для выявления корреляционной связи между рассчитанными по результатам измерения рядами $\Delta f_{\text{ср}}$ и вариациями скорости ветра на высотах МНТ использованы данные спутника TIMED и метеорной РЛС SKiYMET, обсерватории Collm (Коллм), Германия.

TIMED – The Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics Mission – низкоорбитальный (625 км) спутник NASA, выполняющий мониторинг параметров верхней атмосферы Земли с 2001 года. Один из четырех приборов TIMED – "TIMED Doppler Interferometer", TIDI позволяет выполнять измерения "мгновенных" профилей горизонтального ветра (зональной и меридиональной компонент) в области высот 60 – 300 км, которая включает метеорную зону атмосферы Земли. Разрешение измеренного профиля по высоте составляет 2,5 км, погрешность определения мгновенной скорости ветра составляет 3 м/с (для высот 90 км). Время измерения одного профиля составляет 100–200 с, в результате чего номинальное расстояние между измеренными профилями составляет 750 км вдоль траектории орбиты спутника [19].

Для апреля 2010 г. количество измеренных профилей ветра над областью размером 10x10 градусов широты/долготы с центром в г. Харьков (50°N 36,2°E) составляло до трех профилей/день. Сравнительно низкую статистическую обеспеченность данных о профилях ветра для локальной области компенсируют следующие достоинства:

- 1) По измеренным TIDI величинам можно восстановить вектор горизонтального ветра;
- 2) Измеренные TIDI профили ветра были получены параллельно с выполненными экспериментальными измерениями и соответствуют области пространства, в которой находились метеорные следы, отразившие принятые используемым устройством СТВ.

Метеорная РЛС обсерватории Collm (51.3°N, 13°E) (типа SKiYMET) проводит непрерывный мониторинг динамики ветрового режима на высотах МНТ с июля 2004 г. Импульсная мощность этой метеорной РЛС составляет 6 кВт, рабочая частота 32,6 МГц [20 – 21].

Результаты измерений спутника TIMED и метеорной РЛС в Collm были использованы для расчета вектора среднего ветра в МНТ для дат проведения экспериментальных исследований и сравнения вариаций компонент вектора ветра с измеренными величинами $\overline{\Delta f_{cp}}$ по СТВ различных ТВ РПУ (рис. 4, 5). Используем обозначения: $\overline{V_{TIDI}}$ – вектор среднего ветра на высотах 87,5 – 92,5 км (среднечасовые значения), рассчитанный по результатам измерений спутника TIMED над г. Харьков для апреля 2010; $\overline{V_{COLLM}}$ – вектор среднего ветра на высотах 87,5 – 92,5 км (среднечасовые значения), рассчитанный по результатам измерений метеорной РЛС Collm для апреля 2010 г.

Исследование корреляционной связи между осредненными суточными вариациями Δf_{cp} и проекциями векторов $\overline{V_{TIDI}}$ и $\overline{V_{COLLM}}$ на различные направления (рис. 5) показывает следующее:

1. Вариация Δf_{cp} имеет максимум корреляции с "продольной" компонентой $\overline{V_{TIDI}}$ и $\overline{V_{COLLM}}$, которая параллельна направлению из приемной позиции на предполагаемый источник принятых СТВ. Для случая, когда временной ряд Δf_{cp} получен по сигналам от нескольких ТВ РПУ с одинаковыми рабочими частотами, максимум коэффициента корреляции лежит "между" азимутами на предполагаемые источники принятых СТВ (для $f_0 = 59,239583$ МГц (СНЧ ~ -10,4 кГц); ТВ РПУ в городах: Старый Оскол, Дубки, Bälti).

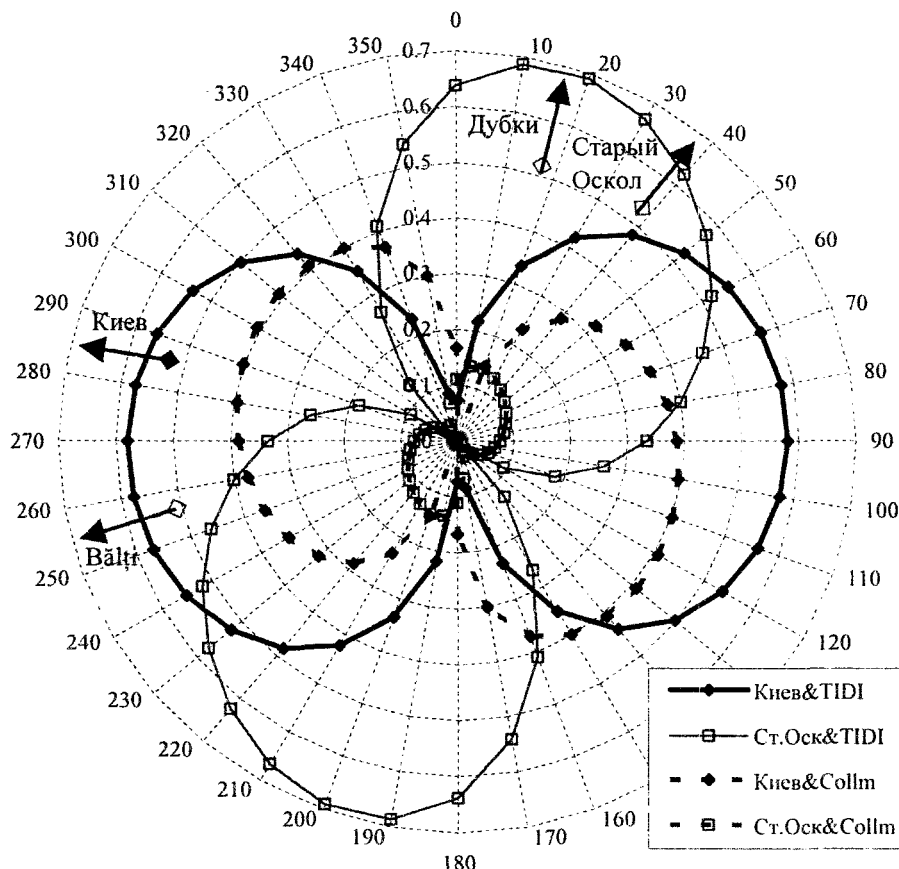
2. ТВ РПУ г. Киев расположен относительно приемной позиции на западном направлении, измеренные величины Δf_{cp} на $f_0 = 59,25$ МГц коррелируют с зональной компонентой $\overline{V_{TIDI}}$ и $\overline{V_{COLLM}}$; Направление на ТВ РПУ в г. Старый Оскол, Дубки близкое к северному, измеренные величины Δf_{cp} на $f_0 = 59,239583$ МГц коррелируют с меридиональной компонентой $\overline{V_{TIDI}}$ и $\overline{V_{COLLM}}$.

3. Оценка значимости коэффициента корреляции [22] показывает, что при величине коэффициента корреляции более 0,58 с вероятностью более 0,95 можно отвергнуть гипотезу о некоррелированности рядов Δf_{cp} с соответствующей проекцией вектора $\overline{V_{TIDI}}$.

824337

4. Вариация Δf_{cp} имеет минимум корреляции с "поперечной" компонентой $\overline{V_{TIDI}}$ и $\overline{V_{COLLM}}$, которая ортогональна направлению из приемной позиции на предполагаемый источник принятых СТВ. В этом направлении величина коэффициента корреляции не более чем 0,08.

5. Корреляция между вариацией Δf_{cp} и проекциями $\overline{V_{COLLM}}$ (по шкалам локального времени, соответствующих г. Харьков (для Δf_{cp}) и Collm ($\overline{V_{COLLM}}$)) меньше по сравнению с корреляцией между вариацией Δf_{cp} и проекциями $\overline{V_{TIDI}}$. Это вызвано тем, что $\overline{V_{COLLM}}$ соответствует другой области МНТ, которая находится на расстоянии в $23,2^\circ$ долготы на Запад от области, в которой выполнены измерения Δf_{cp} и $\overline{V_{TIDI}}$.



- Закрашенные маркеры соответствуют Δf_{cp} по СТВ на рабочей частоте ТВ РПУ в г. Киев, $f_0 = 59,25$ МГц;
- Незакрашенные маркеры соответствуют Δf_{cp} по СТВ на рабочей частоте ТВ РПУ в г. Старый Оскол, Дубки, Bălți, $f_0 = 59,239583$ МГц (СНЧ $\sim -10,4$ кГц);
- Сплошная линия – корреляция Δf_{cp} с проекциями $\overline{V_{TIDI}}$ (по данным спутника TIMED);
- Пунктирная линия – корреляция Δf_{cp} с проекциями $\overline{V_{COLLM}}$ (по данным метеорной РЛС Collm).

Рис. 5

Выводы

Исследована возможность применения сигналов телевизионного вещания в качестве зондирующих для измерения скорости ветра на высотах мезопаузы – нижней термосферы методом радиолокации метеорных следов. Такое использование сигналов телевизионного вещания позволяет исключить передающее устройство из состава измерительной установки и, следовательно, уменьшить расходы на проведение измерений. Разработанная методика и аппаратура позволили провести цикл пробных измерений и сравнить его результаты с данными специализированного спутника TIMED и метеорной РЛС SKiYMET. Результаты сравнения показывают, что коэффициент корреляции между результатами измерений достигает 0,58 (по анализу значимости коэффициента корреляции с вероятностью более чем 0,95 мож-

но отвергнуть гипотезу о некоррелированности результатов измерения). Причем, максимум корреляции наблюдается с той компонентой скорости ветра, которая коллинеарна направлению от приемного устройства к соответствующему телевизионному радиопередатчику. В ортогональном направлении наблюдаются минимальные величины коэффициента корреляции, не более чем 0,08.

Проведенные измерения впервые показывают возможность использования сигналов телевизионного вещания для измерения скорости ветра методом радиолокации метеорных следов, а применяемая аппаратура может быть взята за основу при создании разнесенных пунктов мониторинга вектора ветровых движений на высотах мезопаузы – нижней термосферы на базе существующей сети телевизионного вещания.

Список литературы: 1. Мак-Кинли Д. Методы метеорной астрономии. – М.: Мир, 1964. – 384 с. 2. Кащеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. – М.: Наука, 1967. – 260с. 3. Олейников А.Н., Кащеев Б.Л. Исследование атмосферных динамических процессов в области мезопаузы – нижней термосферы методом радиолокации метеорных следов // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / под общ. ред. Б.Л. Кащеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. – Харьков: ХНУРЭ, Бизнес Информ, 2002. – С. 133-172. 4. Hocking, W.K., Fuller, V., Vandeppeer, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. – Vol. 63. – P. 155-169. 5. Олейников А. Н., Сосновчик Д. М., Шкарлет А. И. Использование сигналов телевизионного вещания для исследования вариаций коэффициента заполнения метеорного канала связи // Вестник Гос. ун-та информационно-коммуникационных технологий. – 2006. – Т.4, №3. – С. 143-149. 6. Лыков Ю.В., Олейников А.Н. Исследование характеристик метеорного радиоканала с использованием сторонних источников радиоизлучения // Вісник ДУІКТ, 2008. – Т. 6. №4. – С.296-303. 7. Использование сигналов телевизионного вещания для исследования процессов в метеорной зоне атмосферы Земли / А. Н. Олейников, Д. М. Сосновчик, Ю. В. Лыков, В. Д. Кукуш, С. А. Маковецкий // Радиотехника. – 2010. – Вып. 160. – С. 47–55. 8. Скольник М. Справочник по радиолокации // пер.с англ. К.Н. Трофимов. Т. 4. – М.: Сов. радио, 1978. – 376с. 9. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с. 10. ГОСТ 7845-92. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений: введ. 01.01.93. 11. Кукуш В.Д., Олейников А.М., Маковецкий С.О. Заявка на патент Украины на корисну модель № u2010 08168. Спосіб вимірювання швидкості вітру методом радіолокації метеорних слідів за сигналами телевізійного мовлення. Дата подання 30.06.10, рішення про видачу патенту України на корисну модель від 10.03.11. 12. Олейников А. Н., Лыков Ю. В., Кукуш В. Д. Повышение эффективности разнесенной системы радиолокации метеорных следов // Радиотехника. – 2009. – Вып. 157. – С. 5–12. 13. Radio-Frequenzen und Senderkarten weltweit. – URL: <http://www.fmscan.de> (дата обращения: 07.04.2011). 14. ГОСТ 20532-83 Радиопередатчики телевизионные I-V диапазонов. Основные параметры, технические требования и методы измерений: введ. 01.07.84. 15. Кукуш В. Д., Олейников А. Н. Оценка возможности определения скорости дрейфа метеорного следа по сигналам телевизионного вещания // Современные информационные и электронные технологии: XI междунар. науч.-практ. конф.: материалы конф. Одесса: ОНПУ, 2010. С. 218. 16. Кукуш В.Д., Олейников А.М., Маковецкий С.О. Заявка на патент Украины на корисну модель № u2010 13684. Пристрій вимірювання швидкості вітру методом радіолокації метеорних слідів за сигналами телевізійного мовлення. Дата подання 18.11.10, рішення про видачу патенту України на корисну модель від 09.02.11. 17. Ханзел, Г. Е. Справочник по расчету фильтров // пер.с англ. А.Е. Знаменский. – М.: Сов. радио, 1974. – 288с. 18. Meteor radar temperatures over Collm (51.3°N, 13°E) / Stober, G., Jacobi, Ch., Fröhlich, K., Oberheide, J. // Adv. Space Res. 2008. Vol. 42, P.1253–1258. 19. TIMED Doppler Interferometer: Overview and recent results / Killeen, T. L. Wu, Q., Solomon, S. C., Ortland, D. A., Skinner, W. R., Niciejewski, R. J. // J. Geophys. Res., 111, A10S01, doi:10.1029/2005JA011484. 20. Meteor radar wind and temperature measurements over Collm (51,3°N, 13°E) and comparison with co-located LF drift measurements during autumn 2004 / Jacobi Ch. Kürschner D., Fröhlich K. Arnold K., Tetzlaff G. // Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig. 2005. Band 36. P.98–112. 21. Jacobi Ch. Meteor radar measurements of mean winds and tides over Collm (51.3°N, 13°E) and comparison with LF drift measurements 2005-2007 // Adv. Radio Sci., accepted 14.2.2011. 22. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Харьковский национальный
университет радиотехники

Поступила в редколлегию 15.04.2011