

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ МЕЗОПАУЗЫ-НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ МЕТОДОМ РАДИОЛОКАЦИИ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ ПО СИГНАЛАМ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

Кукуш В. Д., Олейников А. Н.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. Основ радиотехники, тел. (057) 702-14-30,
E-mail: K.Vitalii@ymail.com; ortoan@rambler.ru

The possibility of using of terrestrial television broadcast signals as sounding signals for mesosphere-lower thermosphere (MLT, 80-105 km) wind measurements by the radio meteor method is investigated. The given work shows results of modelling and error estimation of the developed measuring technique.

Метод радиолокации метеорных следов является одним из основных для мониторинга ветровых движений на высотах мезопаузы-нижней термосферы (МНТ, 80-105 км) [1]. Принцип измерения скорости ветра основан на регистрации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) отраженных от метеорных следов зондирующих сигналов метеорной РЛС (МРЛС). Для радионаблюдений за метеорными следами могут быть также использованы сигналы телевизионного вещания (СТВ). При этом не требуется излучать специализированный зондирующий сигнал, что позволяет сократить себестоимость подобных измерений за счёт значительного снижения энергопотребления, стоимости регламентных работ и отсутствия платы за использование радиочастотного ресурса. Цель данной работы - дальнейшее развитие исследований в этом направлении [2], а именно моделирование процесса измерения и оценка погрешности при использовании СТВ для измерения скорости ветра на высотах МНТ методом радиолокации метеорных следов.

Исходными данными для моделирования являлись: высотно-временная структура поля скорости ветра (V) на высотах МНТ, заданная профилями зональной ($u(t, h)$) и меридиональной ($v(t, h)$) компонент; распределение углов места (ϵ), азимутов (φ) и высот (h) метеорных следов; численность метеорных отражений; длина волны (λ) и нестабильность несущей частоты (σ_f) радиосигнала изображения СТВ, выраженная как её среднее квадратическое отклонение (СКО) от рабочей частоты; широта расположения приёмной позиции (фиксированная величина равная 50°); азимут (φ_r) и расстояние (R) до «используемого» телевизионного радиопередатчика (ТВ РПУ). В результате расчёта по ДСЧ телевизионных сигналов отраженных от метеорных следов определялись мгновенные ($V_{\text{мгн}}$), среднечасовые ($V_{\text{ч}}$) оценки скорости ветра и осреднённая по всему циклу измерений суточная вариация среднечасовых ($V_{\text{оср.ч}}$) оценок скорости ветра в МНТ.

Высотно-временная структура поля скорости ветра задавалась по реальным профилям меридиональной и зональной компонент скорости ветра над областью размером $10^\circ \times 10^\circ$ широты/долготы с центром в г. Харьков ($50^\circ\text{N } 36^\circ\text{E}$). Профили ветра были получены с сайта <http://www.timed.jhuapl.edu> и представляют собой результаты измерения устройства «TIMED Doppler Interferometer» (TIDI), расположенного на борту спутника NASA «The Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics Mission» (TIMED). Для подобной локальной области на поверхности Земли статистическая обеспеченность данных со спутника является сравнительно низкой (до 3 профилей/день). В связи с этим при моделировании использовалась осреднённая суточная вариация среднечасовых профилей ветра, рассчитанных по результатам измерения TIDI за интервал в 3 месяца.

Численность метеорных следов задавалась фиксированной и равной 10 метеоров/час, что в три раза менее среднего количества регистрируемых метеорных следов по СТВ [2].

ДСЧ несущей частоты СТВ отраженного от метеорного следа рассчитывалось как:

$$F_d = \frac{1}{\lambda} \cdot \vec{V} \cdot (\vec{r}_{MT} + \vec{r}_{MR}) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(u(t, h) \cdot \vec{i}_{WE} + v(t, h) \cdot \vec{j}_{SN} \right) \cdot \left(\vec{r}_{MT} + \vec{r}_{MR} \right), \quad (1)$$

где $\vec{i}_{WE}, \vec{j}_{SN}$ – орты в направлении с Запада на Восток и с Юга на Север соответственно в точке расположения метеорного следа; $\vec{r}_{MT}, \vec{r}_{MR}$ – орты в направлении от метеорного следа к передающей и приёмной позициям.

Расчёт по формуле (1) выполнялся методами аналитической геометрии в пространстве с учётом кривизны поверхности Земли и без учёта рефракции радиоволн. Величины $\vec{r}_{MT}, \vec{r}_{MR}, \vec{i}_{WE}, \vec{j}_{SN}$ определялись по заданным пространственным координатам отражающей области метеорного следа (ε, φ, h) и ТВ РПУ (φ_T и R) относительно приёмной позиции, которая размещалась в начале отсчёта трёхмерной прямоугольной системы координат. Параллельно с расчётом ДСЧ выполнялся отсев метеорных следов, образованные которыми трассы распространения сигналов не могут быть использованы при измерениях из-за их экранирования сферической поверхностью Земли.

Одним из основных источников погрешности в исследуемом способе измерения является нестабильность несущей частоты зондирующего сигнала (сигнала от «используемого» ТВ РПУ), σ_f , которая вызывает случайное дополнительное смещение результатов измерения ДСЧ отраженных от метеорных следов СТВ. Такое влияние нестабильности частоты может быть учтено путём внесения поправки, образованной по результатам синхронного измерения несущей частоты СТВ, распространяющегося от «используемого» ТВ РПУ «земной волной». Это сопряжено с рядом технических сложностей, особенно при $R > 50$ км и в рамках данной работы рассматриваться не будет. В данной модели σ_f задавалась равной 2 Гц, что соответствовало экспериментально определённой величине СКО несущей частоты реального СТВ относительно величины рабочей частоты ТВ РПУ на интервале измерения в 0,1 с (среднее время существования метеорного следа [1, 2]) и более [3].

Переход от значений ДСЧ отраженных от метеорных следов СТВ к оценкам скорости ветра осуществлялся по формуле, обратной (1). Для получения однозначного решения предполагалось, что «измеренные» ДСЧ вызваны компонентой скорости ветра, направленной вдоль прямой передающая-приёмная позиции, а координаты метеорных следов имеют фиксированные значения, равные средним величинам ε, φ, h ($m_\varepsilon, m_\varphi, m_h$ соответственно) [4]. Полученная таким образом оценка компоненты скорости ветра в области МНТ с центром в $m_\varepsilon, m_\varphi, m_h$ и шириной, пропорциональной $\sigma_\varepsilon, \sigma_\varphi, \sigma_h$ (V'), сравнивалась с «истинной» величиной V , которая рассчитана непосредственно по заданным на входе модели профилям $u(t, h), v(t, h)$. В качестве критерия соответствия использовались: коэффициент корреляции временных рядов V' и $V(r)$, СКО их значений (σ_V) и отсчётов амплитудных спектров ($\sigma_{ff(V)}$). Величины $r, \sigma_V, \sigma_{ff(V)}$ рассчитывались для рядов $V_{мн}$ и $V'_{мн}$; $V_ч$ и $V'_ч$; $V_{оср.ч}$ и $V'_{оср.ч}$, полученных по результатам моделирования.

Исходя из возможности технической реализации, моделированию подлежали следующие варианты построения МРЛС:

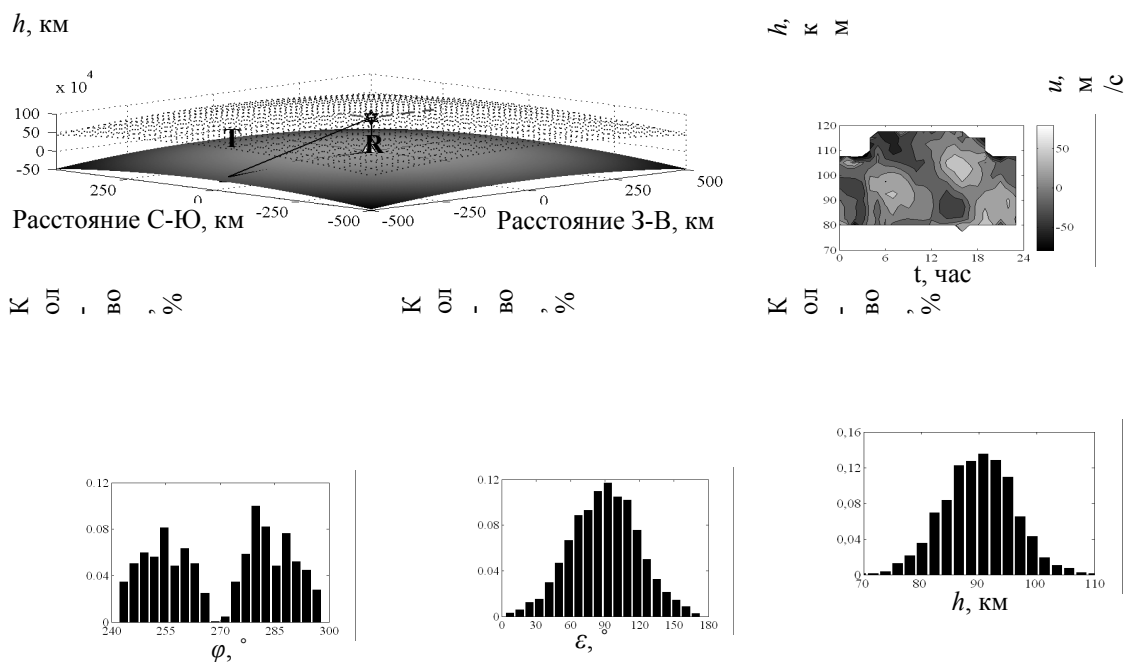
1) *совмещённая угломерная МРЛС* ($R = 30$ м) с синхронизацией опорных частот между приёмной и передающей позициями ($\sigma_f = 0,1$ Гц), восточным направлением зондирования ($m_\varphi = 90^\circ$) под углом 30° к горизонту ($m_\varepsilon = 30^\circ$) и селекцией метеорных следов по пространственным координатам ε, φ, h с СКО ошибок $\sigma_\varepsilon = 17'$; $\sigma_\varphi = 17'$; $\sigma_h = 0,3$ км соответственно. Средняя высота наблюдаемых метеорных следов, $m_h = 90$ км. Законы распределения ε, φ, h метеорных следов – нормальные. Приведенные исходные данные соответствуют характеристикам типовых совмещённых МРЛС с собственным зондирующим сигналом [1].

2) *угломерная МРЛС с разнесёнными приёмной/передающей позициями* без синхронизации опорных частот ($R = 500$ км), использующая СТВ в качестве зондирующего сигнала ($\sigma_f = 2$ Гц [3]); направление максимума диаграммы направленности (ДН) приёмной антенны – вертикальное [4] ($m_\varepsilon = 90^\circ$), с селекцией метеорных следов по пространственным координатам ε, φ, h с СКО ошибок $\sigma_\varepsilon = 1^\circ$; $\sigma_\varphi = 1^\circ$; $\sigma_h = 1,5$ км. Передающая позиция

расположена на Западе относительно приёмной, за счёт чего $m_\varphi = 270^\circ$. Законы распределения ε , φ , h метеорных следов – нормальные.

3) МРЛС с разнесёнными приёмной/передающей позициями без синхронизации опорных частот при различных $R = 50, 100, 500, 1000$ км, использующая СТВ в качестве зондирующего сигнала ($\sigma_f = 2$ Гц [3]). Направление максимума ДН приёмной антенны – вертикальное [4] ($m_\varepsilon = 90^\circ$), селекция метеорных следов по ε , φ выполняется только за счёт вида ДН приёмной антенны. Селекция метеорных следов по h не выполняется, $\sigma_h = 6$ км, что соответствует СКО распределения высот радиометеоров [1]. Тип приёмной антенны – «трёх-элементный волновой канал» с шириной ДН по уровню половинной мощности $60^\circ - 90^\circ$, что обеспечивает селекцию метеорных следов по угловым координатам с $\sigma_\varepsilon = 30^\circ$; $\sigma_\varphi = 30^\circ$. Законы распределения ε , h метеорных следов – нормальные, закон распределения φ вследствие «грубой» пространственной селекции имеет подверженный суточной вариации двумодальный закон с расположением максимумов при $\varphi = \pm 15^\circ$ относительно направления на передающую позицию [5]. Передающая позиция расположена на Западе относительно приёмной, за счёт чего $m_\varphi = 270^\circ$.

Для каждого варианта 1 - 3 выполнялось по 30 сеансов моделирования, поясняющая графическая информация к одному из которых приведена на рис. 1. Каждый сеанс моделирования соответствовал 15 дням измерений скорости ветра в МНТ по метеорным следам со средней численностью 10 метеоров/час для области, соответствующей заданными m_φ , σ_φ ; m_ε , σ_ε ; m_h , σ_h . Полученные в результате моделирования оценки погрешностей измерения осреднённых суточных вариаций среднечасовой скорости ветра приведены в табл. 1.



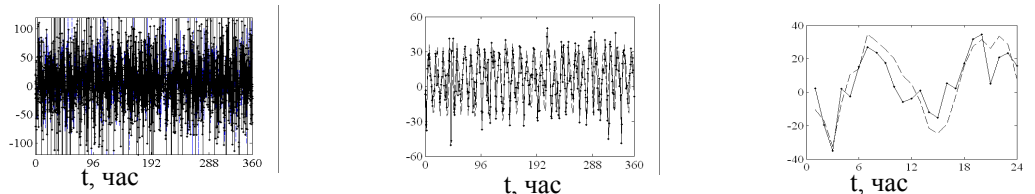
$V, V', \text{ м/с}$
 $V_{\text{ч}}, V'_{\text{ч}}, \text{ м/с}$
 $V_{\text{оср.ч}}, V'_{\text{оср.ч}}, \text{ м/с}$


Рис. 1. Пример сеанса моделирования МРЛС с разнесенными приёмной/передающей позициями (вариант 3) при $R = 500$ км. На рисунке (слева-направо, сверху-вниз): эскиз траектории распространения зондирующего сигнала (СТВ); осреднённая суточная вариация профиля ветра в МНТ $u(t, h)$; распределения метеорных следов по пространственным координатам φ, ε, h ; полученные на выходе модели вариации $V_{\text{мгн}}$ и $V'_{\text{мгн}}$; $V_{\text{ч}}$ и $V'_{\text{ч}}$; $V_{\text{оср.ч}}$ и $V'_{\text{оср.ч}}$ ($V_{\text{мгн}}, V_{\text{ч}}, V_{\text{оср.ч}}$ – пунктирная линия, $V'_{\text{мгн}}, V'_{\text{ч}}, V'_{\text{оср.ч}}$ – сплошная линия)

Табл. 1 – Результаты моделирования и оценки погрешностей (по рядам $V_{\text{оср.ч}}$ и $V'_{\text{оср.ч}}$)

	r	$\sigma_V, \text{ м/с}$	$\sigma_{\text{фф}(V)}, \text{ м/с}$
Совмещённая угломерная МРЛС (вариант 1)	0,999	0,8	0,2
Угломерная МРЛС с разнесенными приёмной / передающей позициями (СТВ - зондирующий сигнал, вариант 2)	0,994	2,3	0,6
МРЛС с разнесенными приёмной / передающей позициями (СТВ - зондирующий сигнал, вариант 3), $R = 50$ км	0,67	14,8	4,7
- \ \ - , $R = 100$ км	0,76	13,2	3,8
- \ \ - , $R = 500$ км	0,85	10,3	2,9
- \ \ - , $R = 1000$ км	0,95	7,1	2,1

Приведенные результаты моделирования и оценки погрешностей показывают, что измерение скорости ветра методом радиолокации метеорных следов по СТВ характеризуется неизбежно большими погрешностями, чем измерения, проведенные совмещёнными угломерными МРЛС с собственным зондирующим сигналом. Однако погрешность оценки скорости ветра по СТВ уменьшается при увеличении расстояния между приёмной и передающей (ТВ РПУ) позициями или при оснащении приёмной позиции угломерным устройством. Простейший вариант измерения скорости ветра в МНТ по СТВ может быть реализован системой, в которой пространственная селекция СТВ отраженных от метеорных следов выполняется за счёт ДН приёмной антенны и приёмное устройство только обнаруживает отраженный сигнал и измеряет его ДСЧ (смещение несущей частоты отраженного сигнала относительно величины рабочей частоты «используемого» ТВ РПУ). Такая система могла бы проводить непрерывный мониторинг амплитуд и фаз атмосферных приливов, так как величина погрешности определения амплитуд гармоник осреднённой суточной вариации скорости ветра ($\sigma_{\text{фф}(V)}$) менее ожидаемых величин амплитуд приливных колебаний и составляет 14 - 30% (для $R = 1000$ км) от их значений (средняя амплитуда приливных колебаний с периодами 12 и 24 ч для высот МНТ над харьковской областью составляет 15 и 7 м/с соответственно [1]). При этом коэффициент корреляции r принимает значения более 0,6, что позволяет при объёме выборки более 12 отсчётов с надёжностью вывода более 0,95 отвергнуть гипотезу о некоррелированности оцененного по СТВ осреднённого суточного хода скорости ветра в МНТ с его «действительной» величиной. Для решения ряда задач в рамках международных геофизических проектов такие характеристики аппаратуры являются приемлемыми. Так же следует указать на относительную дешевизну данного способа измерений, которая вызвана возможностью его организации на базе существующей сети телевизионного вещания без дополнительного излучения специализированных радиосигналов.

Литература.

1. *Олейников А.Н., Кашеев 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. Кашеева, Е.Г. Прошкина, М.Ф. Лагутина. Харьков: ХНУРЭ, Бизнес Информ, 2002. С. 133-172.
2. *Использование сигналов телевизионного вещания для исследования процессов в метеорной зоне атмосферы Земли / А. Н. Олейников и др.*// Всеукр. межвед. научн.–техн. Радиотехника сб. — 2010. — вып. 160. — С. 47–55.
3. *Кукуш В. Д., Олейников А. Н.* Оценка возможности определения скорости дрейфа метеорного следа по сигналам телевизионного вещания // Современные информационные и электронные технологии : XI международная научно-практическая конф. : материалы конф. Одесса: ОНПУ, 2010. С. 218.
4. *Пат. 58636* Україна, МПК G 01 S 13/58 (2006.01). Спосіб вимірювання швидкості вітру методом радіолокації метеорних слідів за сигналами телевізійного мовлення / Кукуш В.Д., Олейников А.М., Маковецкий С.О.; Заявник і власник ХНУРЕ. — заявка u2010 08168; заявл. 30.06.2010; опубл. 26.04.2011 бюл. №8/2011. 5. *Курганов, Р.А.* Прогнозирование наклонного рассеивания радиоволн метеорными ионизациями. Изд-во Казанского университета . — 1973 . — 78с.