

ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРОПОСФЕРЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, О.А. СОЛЯНИК, Д.Б. ЕВСЕЕВ

Приводятся технические характеристики и описание аппаратуры РЛС вертикального зондирования метрового диапазона длин волн. Описываются результаты экспериментального исследования характеристик турбулентных процессов радиолокационным методом. Отмечается анизотропность атмосферных процессов в атмосфере. Рассмотрена методика измерений поляризационных характеристик сигналов, отраженных от атмосферных неоднородностей. Представлены результаты поляризационных измерений.

The performance and description of the one-metre wave band vertical probing radar equipment are given. The results of the experimental study of the characteristics of turbulent processes by a radar method are described. The anisotropy of atmosphere processes in the atmosphere is observed. The methods of measuring polarization characteristics of signals reflected from atmospheric inhomogeneities is considered. The results of polarization measurements are provided.

Радиолокационные станции вертикального зондирования или ветровые профилометры позволяют определять параметры поля скорости ветра над точкой зондирования в тропосфере и нижней части стратосферы. Для получения информации о динамике атмосферных движений используется явление отражения электромагнитных волн от неоднородностей диэлектрической проницаемости атмосферы. Временное положение отраженного сигнала и сдвиг по частоте, обусловленный эффектом Доплера, дают достаточно точную информацию о высоте и скорости перемещения атмосферных неоднородностей. Анализ параметров отраженных сигналов позволяет получать в реальном масштабе времени информацию о высотном-временном полях скорости ветра и интенсивности турбулентных процессов в атмосфере.

В Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) разработан ряд станций вертикального зондирования метрового и дециметрового диапазонов волн. Стратосферно-тропосферная радиолокационная станция метрового диапазона длин волн (СТ РЛС) расположена в полевой лаборатории университета (49° 24' N, 30° 51' E) вблизи г. Харькова и имеет следующие технические характеристики:

Рабочая частота, МГц	57,3
Импульсная мощность, кВт	250
Ширина ДНА по уровню половинной мощности, град	6
Разрешение по высоте, м	150...300
Диапазон однозначно измеряемых скоростей ветра, м/с ⁻¹	-50...+50
Диапазон исследуемых высот, км	2...15
Время получения профиля скорости ветра, мин	1,0

В комплексе СТ РЛС использованы две однотипные фазированные антенные решетки (ФАР): одна для излучения, а другая для приема (внешний вид излучающей ФАР представлен на рис. 1).

Антенная решётка имеет в своем составе 64 (8 × 8) излучателя. Для уменьшения влияния помех, приходящих под малыми углами к горизонту, приемная ФАР

заключена в экран квадратной формы 48 × 48 м² высотой 6,7 м, выполненный из сетки, который уменьшает уровень помех на 10 дБ. В первую очередь, это относится к сигналам, приходящим под углами, близкими к горизонту.

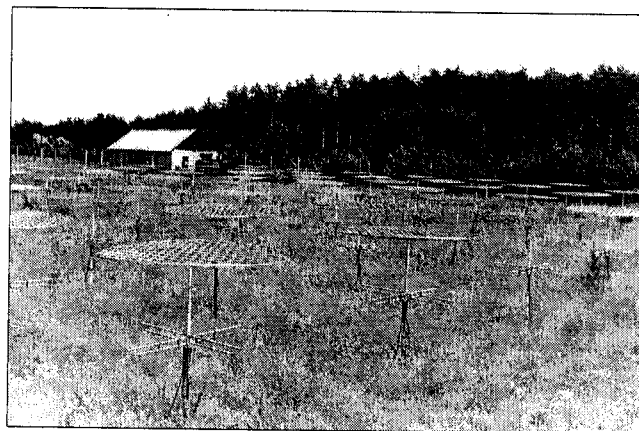


Рис. 1

Развязка между ортогональными каналами не хуже 25 дБ. Согласно результатам измерений, проведенным по внеземным источникам радиоизлучения (Лебедь А и Кассиопея А), ширина ДНА соответствует расчетной, апертура антенны оценивается величиной 1600 м².

Радиопередающее устройство СТ РЛС представляет собой мощный усилитель радиоимпульсов метрового диапазона.

Система обработки данных СТ РЛС построена с использованием предварительной препроцессорной обработки сигналов, что резко снижает поток информации, поступающей в компьютер, и позволяет реализовать обработку результатов зондирования практически в масштабе реального времени. Анализ и параметризация отраженного от неоднородностей атмосферы сигнала производится в частотной области. Типичный вид спектральной плотности мощности отраженного сигнала приведен на рис. 2. Параметризация спектра, т. е. оценка его первых трех моментов – мощ-

ности, ширины сигнальной части спектра и доплеровского сдвига проводится методом наименьших квадратов, который обеспечивает наименьшую погрешность при различных значениях соотношения сигнал — шум и наличии не удаленных остатков земной помехи.

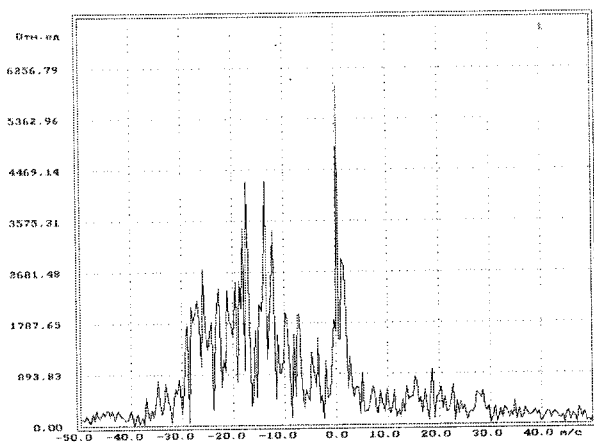


Рис. 2

Вторичная обработка результатов измерений позволяет получить высотные профили горизонтального вектора скорости и направления ветра, спектральную ширину спектра скоростей и мощности спектра в двух ортогональных направлениях зондирования. На рис. 3 приведены вариации зональной и меридиональной компоненты профиля скорости ветра за 10 сеансов измерений, полученных с интервалом 2 мин. Незначительный разброс между отдельными профилями свидетельствует об устойчивом состоянии атмосферы в период времени наблюдения.

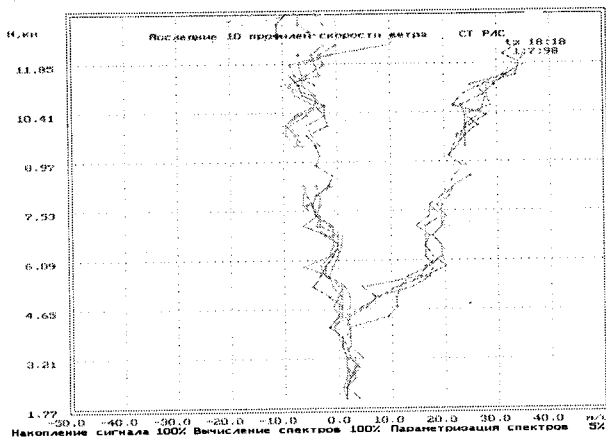


Рис. 3

Метеорологические данные, получаемые на СТ РЛС, могут представляться в виде высотно-временного поля скорости ветра (рис. 4, 5). Столбец векторов отображает среднечасовой профиль скорости и направления ветра. Длина вектора пропорциональна значению модуля скорости ветра (масштаб в правой верхней части рисунка), а его направление соответствует направлению движения ветра, принятому в метеорологии. На этих рисунках представлен высотно-временной ряд измерений длительностью 48 ч с временным интервалом 1 ч, и высотным разрешением 300 м.

На рис. 6, 7 представлены высотно-временные поля модуля скорости ветра и ширина спектра скоростей за тот же период времени. Ширина спектра отраженных сигналов является информативным параметром для индикации турбулентности и сдвига ветра.

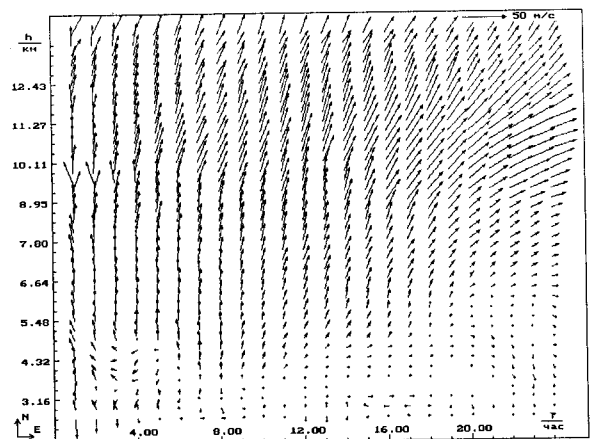


Рис. 4

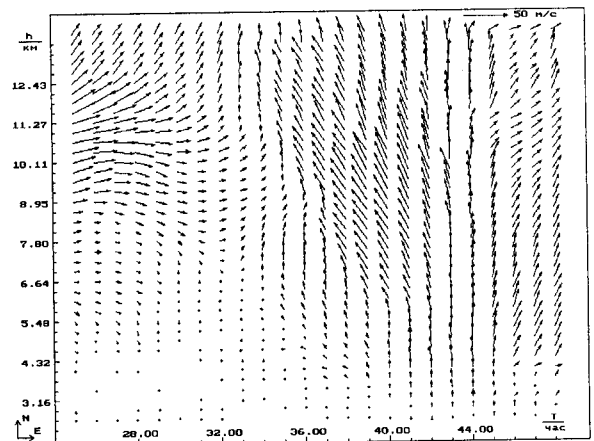


Рис. 5

Для исследования анизотропии мезомасштабной турбулентности использовались значения ширины спектра скорости меридиональной σ_m и зональной σ_z составляющей. В качестве меры анизотропии A взято отношение ширины спектра скоростей меридиональной и зональной компоненты, выраженные в децибелах. Высотно-временное поле модуля параметра A для уровней, превышающих 4 дБ, представлено на рис. 8. Выделяющиеся области повышенной анизотропии соответствуют ячейкам перестройки ветрового режима и областям увеличенной ширины спектра скоростей. Сравнивая это поле с полем модуля скорости ветра, можно отметить, что области параметра A , превышающего величину 4 дБ, почти не встречаются при скоростях ветра менее 20 м/с⁻¹, кроме этого наблюдается заметная корреляция параметра анизотропии A с шириной спектра скоростей.

На рис. 9 представлены радиолокационные характеристики отраженного сигнала в форме так называемого мультимоментного монитора.

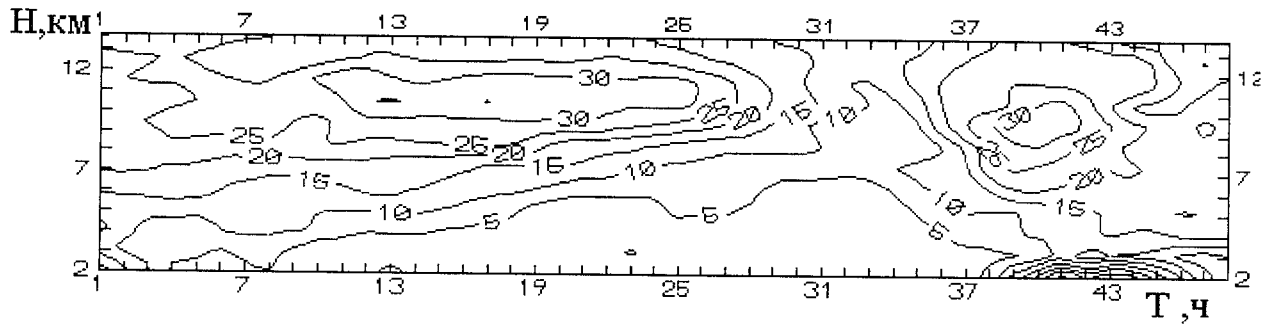


Рис. 6

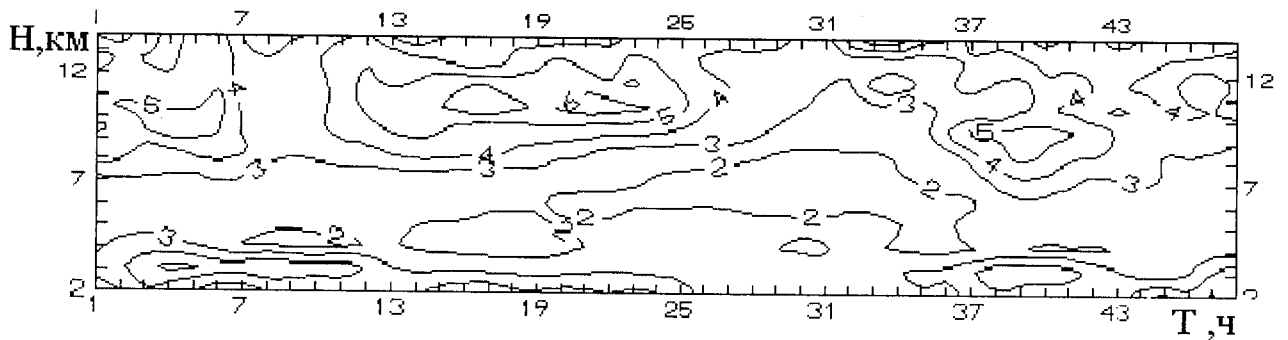


Рис. 7

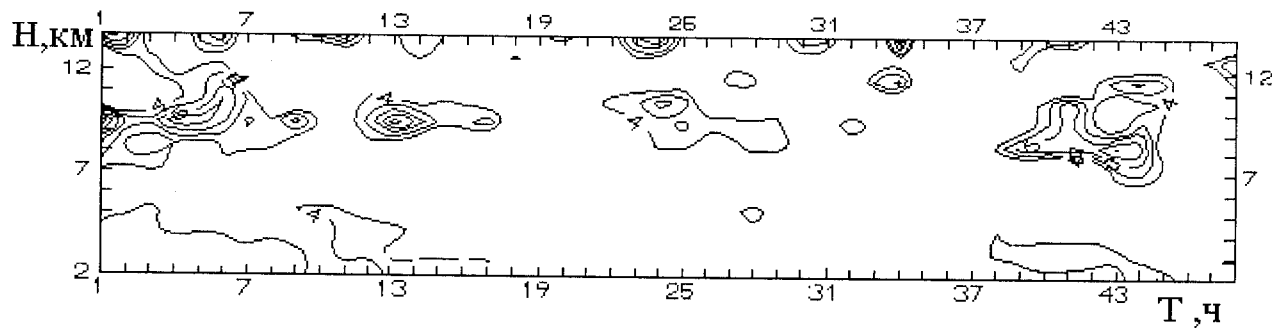


Рис. 8

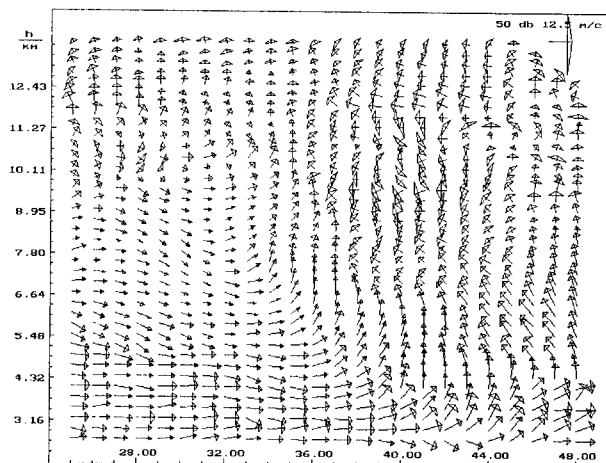


Рис. 9

Здесь длина стрелки отражает уровень принятого сигнала в децибелах, ширина стрелки – ширина спектра скоростей, соответствующая диссипации турбулентной кинетической энергии; поворот вектора пропорционален доплеровскому сдвигу для меридиональной составляющей скорости ветра (масштаб в правой верхней части рисунка). Отчетливо видны области увеличения турбулентности (правый верхний квад-

рант) и зоны низкой турбулентности (высотный уровень 6,6...7,8 км). Ширина спектра скоростей отраженных сигналов является информативным параметром для индикации турбулентности и сдвига ветра. Анализ турбулентных процессов, наблюдаемых на СТ РЛС, показывает, что участкам увеличения скорости ветра (например, на интервале 37...43 ч, высота 6...12 км – рис. 9) в высотном-временном поле соответствуют аналогичные участки в высотном-временном поле ширины спектра скоростей. Для оценки абсолютных величин внешнего и внутреннего масштабов турбулентности были использованы данные аэрологического зондирования и усредненные часовые измерения профилей мощности. Структурная постоянная C_n^2 зависит от температуры, давления, влажности атмосферы, их высотных градиентов, а также от градиентов скорости и коэффициента турбулентного обмена. Она может быть определена как [1]

$$C_n^2 = \frac{a^2 m^2 \bar{P}^2}{4 \bar{T}^4} \left[\frac{K_T}{dU/dh} \right]^{2/3} \left[\left(1 + \frac{15400q}{\bar{T}} \right) \frac{d\theta}{dh} - 7700 \frac{dq}{dh} \right],$$

где a – безразмерный параметр порядка единицы; $m = 1,57 \cdot 10^{-4}$; P – давление воздуха, Мбар; q – удельная влажность; U – скорость ветра, м/с⁻¹; h – высота, м;

T – абсолютная температура; Θ – потенциальная температура; K_T – коэффициент турбулентного обмена.

С другой стороны, структурная постоянная C_n^2 , по данным зондирования на СТ РЛС, может быть определена как [2]:

$$C_n^2 = \frac{529 P_{np} \lambda^{1/3} r^2}{P_t A_{эф} L \Delta h},$$

где P_{np} – принятая мощность, Вт; λ – длина волны РЛС, м; r – дальность, м; P_t – излучаемая мощность, Вт; $A_{эф}$ – эффективная поверхность антенны, м²; L – потери; Δh – разрешение по высоте, м.

Величина коэффициента турбулентного обмена K_T и градиента изменения скорости ветра с высотой характеризует интегральный размер неоднородностей L_0 (внешний масштаб турбулентности):

$$L_0 = \left[\frac{K_T}{\frac{dV}{dh}} \right]^{1/2}.$$

В метеорологии принята эмпирическая зависимость коэффициента турбулентного обмена в зависимости от величины средней скорости ветра и числа Ричардсона (R_i), который характеризует динамическую стабильность атмосферы [3]:

$$K_T = 10^{-4} \frac{V^{-2}}{\left| \frac{dV}{dh} \right|} (17,9 - 11,6 \lg R_i).$$

Сравнительный анализ величины структурной постоянной C_n^2 , полученной по метеорологическим данным, и данных радиолокационного зондирования СТ РЛС позволяет оценить величину коэффициента турбулентного обмена K_T . С помощью оцененной величины K_T и высотного градиента профиля скорости ветра можно определить скорость диссипации энергии турбулентности в единице массы:

$$\varepsilon = K_T \left(\frac{dV}{dh} \right)^2.$$

Задаваясь табличным значением величины кинематической вязкости (ν) [1], можно оценить наименьший размер неоднородностей l_0 и время жизни этих неоднородностей τ_0 :

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon}}; \tau_0 = \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}}.$$

На рис. 10 приведены усредненные за один час высотные зависимости мощности спектра турбулентной составляющей при наклонном зондировании ($\Delta = 15^\circ$) в двух ортогональных направлениях – зональном и меридиональном. Следует отметить сложный характер изменения мощности с высотой и тот факт, что она не инвариантна относительно начальной ориентации электрического вектора излученной волны. Динамический диапазон изменения усредненной мощности спектра турбулентной составляющей по-

рядка 40 дБ. Отличие профилей усредненной мощности (зональной и меридиональной) обуславливает отличие значений внешнего масштаба турбулентности в ортогональных направлениях, т.е. анизотропию внешнего масштаба турбулентности.

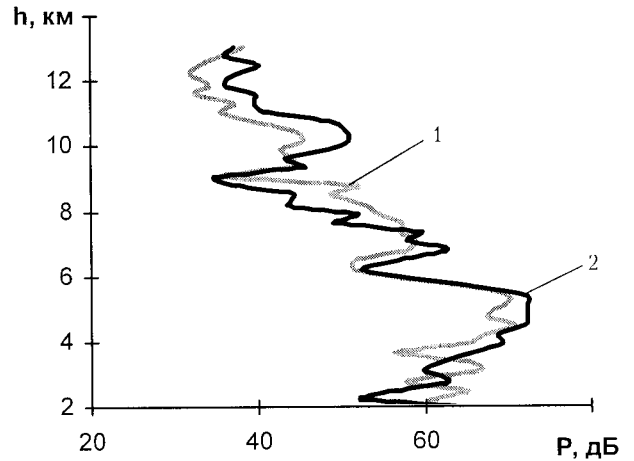


Рис. 10:

- 1 – зондирование в меридиональном направлении;
2 – зондирование в зональном направлении

Следует отметить, что для интервала высот 3,5 ... 7,5 км и 8 ... 12 км коэффициент анизотропии внешнего масштаба турбулентности A_s (отношение внешнего масштаба турбулентности L_0 , полученного при зондировании в зональном направлении, к внешнему масштабу турбулентности, полученному при зондировании в меридиональном направлении) превышает единицу (рис. 11). В районе тропопавзы наблюдается значительное увеличение коэффициента анизотропии, которое достигает восьми.

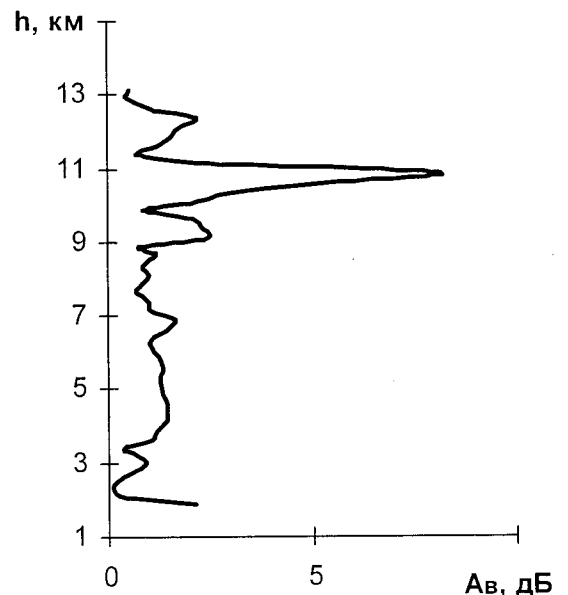


Рис. 11

Время жизни неоднородностей (рис. 12) для анализируемого интервала высот составляет 1...10 с, а для отдельных высот – может достигать 5...10 мин.

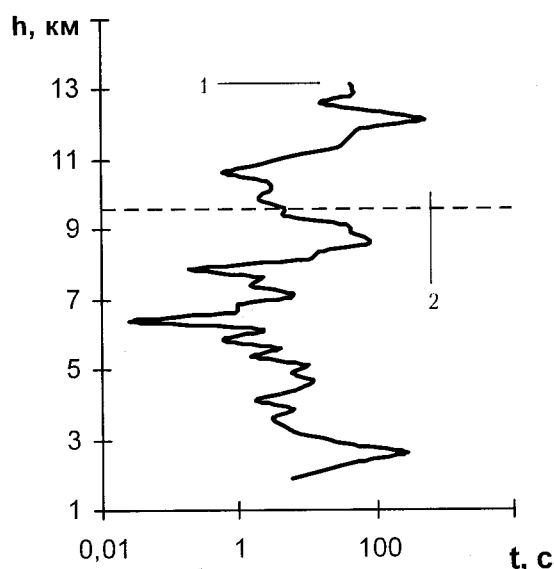


Рис. 12:

1 — время жизни; 2 — высота тропопаузы

Результаты совместных аэрологических измерений СТ РЛС позволили оценить абсолютную величину границ инерционного диапазона длин волн (рис. 13). Для интервала высот 2,5...8 км внешний масштаб турбулентности был равен 10 м или более, достигая иногда величины 100 м и более. Характер изменения внешнего масштаба турбулентности соответствует теоретическому значению, оставаясь почти на порядок меньше для высот атмосферы выше тропопаузы.

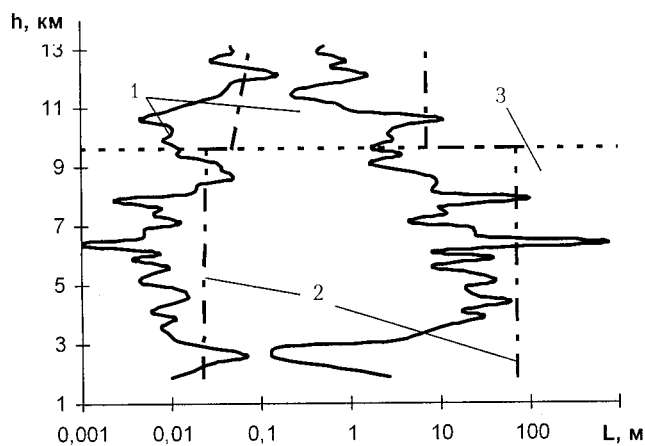


Рис. 13:

1 — экспериментальные данные;
2 — границы внутреннего и внешнего масштаба турбулентности;
3 — высота тропопаузы

При измерении высотного профиля мощности рассеянного сигнала было обнаружено, что при излучении линейной поляризации принятый сигнал присутствует как в согласованной по поляризации антенне, так и в ортогональной. Это говорит о том, что отраженная волна имеет поляризационную структуру, которую можно охарактеризовать эллипсом, форма которого определяется отношением осей — коэффициентом эллиптичности

$$r = \pm \frac{b}{a},$$

где b и a — малая и большая полуоси эллипса соответственно.

Угол ориентации поляризационного эллипса определяется углом β_3 , отсчитываемым против часовой стрелки. Параметры эллипса, выраженные через энергетические характеристики принятой волны (параметры Стокса), определяются следующими выражениями [4]:

$$\alpha_3 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{V}{I},$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{U}{Q},$$

где I , Q , U , V — параметры Стокса.

Параметры Стокса имеют одну размерность и позволяют связывать между собой разнородные характеристики волны, такие как: интенсивность (мощность), являющуюся суммой интенсивностей ортогональных компонент; степень поляризации m для случая частично поляризованной волны; угол эллиптичности α_3 и угол ориентации эллипса β_3 .

Для определения поляризационных характеристик принятого сигнала измерительный комплекс СТ РЛС был дополнен антенной перестраиваемой поляризации, использование которой эквивалентно «методу нескольких антенн».

При проведении поляризационных измерений на комплексе СТ РЛС использовалось три антенны с ДН, ориентированными в зенит. Две из них (передающая и приемная) являются основными антеннами для проведения измерений скорости ветра доплеровским методом и имеют в своем составе по 64 излучателя. Каждая из них имеет два ортогональных канала с ориентацией излучаемого электрического вектора поля север-юг и запад-восток. Был поставлен эксперимент по выявлению высотной поляризационной структуры принимаемого сигнала [5, 6]. Все измерения проводились в ночное время суток в отдельные дни 1987г. (3, 16, 17, 25 ноября) для уменьшения возможного влияния непреднамеренных помех. Высотное разрешение во всех представленных измерениях составляло 450 м. Направление излучения и приема для всех представленных поляризационных измерений вертикальное.

В целом наблюдаемая волна эллиптически поляризована и имеет как левое, так и правое направления вращения вектора электрического поля. Соотношение осей эллипса соответствует коэффициенту эллиптичности, модуль которого изменяется от 0 до 1. Для наблюдаемых высот ориентация главной оси эллипса принятого сигнала группируется относительно направления ориентации вектора электрического поля излучаемой волны. Статистический анализ результатов измерений показывает, что для 60 % обработанных сигналов коэффициент эллиптичности заключен

в интервале $|r|=0...0,2$, а угол ориентации большей оси эллипса занимает сектор углов $\beta_0=0...10^\circ$.

На рис. 14 приведен профиль ориентации большей оси поляризационного эллипса для измерений с ориентацией излучаемого вектора поля север — юг и запад — восток соответственно. Можно отметить знакопеременную корреляционную связь высотных зависимостей ориентации большей оси эллипса для двух режимов измерений, что свидетельствует о наличии горизонтальной анизотропии поляризационных характеристик рассеяния радиоволн неоднородностями тропосферы.

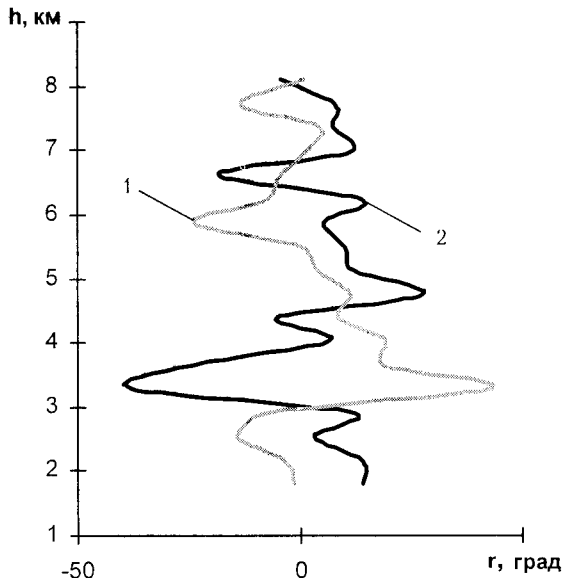


Рис. 14:

1 — ориентация излученного электрического вектора поля север — юг; 2 — ориентация излученного электрического вектора поля «запад — восток»

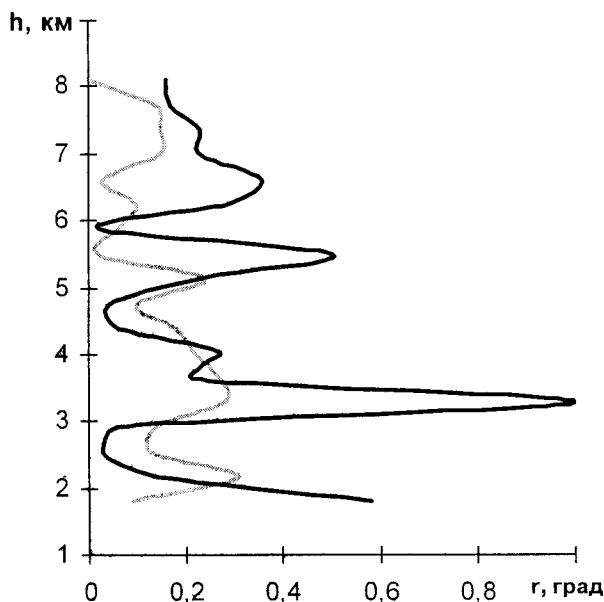


Рис. 15

Такие же выводы можно сделать о поведении высотных профилей коэффициентов эллиптичности r ,

рис. 15, для аналогичных режимов проведения измерений. Наблюдаемые поляризационные явления, очевидно, обусловлены дифракцией электромагнитных волн на плавных диэлектрических неоднородностях тропосферы, характеристики которых сходны с характеристиками диэлектрических клиньев с малым поглощением [7]. Рассеянная на таких неоднородностях электромагнитная волна содержит составляющие противоположной поляризации, уровень которой зависит от величины диэлектрической проницаемости клина, угла раствора клина и угла прихода плоской волны.

Необходимые условия для образования диэлектрических структур, приводящих к появлению поляризационных эффектов могут создаваться в результате действия ветровых сдвигов или других выравнивающих процессов.

Литература: 1. Корсунецкий Л.Н. Распространение радиоволн при самолетной радиосвязи. М.: Сов. радио, 1965. — 408 с. 2. Hocking W.K. The relationship between strengths of turbulence and backscattered radar power at HF and VHF // Handbook for MAP. — Urbana, Illinois. — 1983. — Vol. 9. — P. 289–301. 3. Мамвеев Л.Т. Количественные характеристики турбулентного обмена в верхней тропосфере и нижней стратосфере // Известия АН СССР. Сер. Геофизическая. — 1958. — № 7. — С. 927–921. 4. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. — 440 с. 5. Соляник О.А., Олейников В.Н. Исследование поляризационных характеристик радиоволн метрового диапазона, рассеянных в тропосфере // Тез. докл. XVI Всесоюз. конференции по распространению радиоволн. Харьков. Часть I. С. 92. 6. Kashcheyev B., Oleynikov V., Oleynikov A., Solyanik O., Karabanov A. Some results of the atmospheric wind profiler of Kharkov University of Radioelectronics // Meteorol. Zeitschrift, N. F. 7 (Dezember 1998). P. 332–335. 7. Нефедов Е.Н. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах. М.: Наука, 1979. — 271 с.

Поступила в редколлегию 14.10.03 г.



Олейников Владимир Николаевич, канд. техн. наук., доц. кафедры РЭС ХНУРЭ. Область научных интересов: антенно-фидерные системы радиолокационных станций, исследования атмосферы, радиометеорные исследования, обработка и анализ результатов.



Соляник Олег Анатольевич, канд. техн. наук., ст. научн. сотрудник НУЦ ХНУРЭ. Область научных интересов: антенно-фидерные системы радиолокационных станций, исследования атмосферы, радиометеорные исследования, обработка и анализ результатов.



Евсеев Дмитрий Борисович, аспирант кафедры РЭС, ХНУРЭ. Область научных интересов: антенно-фидерные системы радиолокационных станций, исследования атмосферы, радиометеорные исследования, обработка и анализ результатов.