

# ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 551.508.85.9

## СПЕКТР ФЛУКТУАЦИЙ НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТРОПОСФЕРЫ

Е.Н. БЕЛОВ, О.А. ВОЙТОВИЧ, А.В. ЗАЦЕРКЛЯНАЯ, Г.А. РУДНЕВ, Г.И. ХЛОПОВ,  
С.И. ХОМЕНКО

Приведены результаты годичного экспериментального исследования спектров флуктуаций некогерентных сигналов, отраженных от мелкомасштабных неоднородностей тропосферы. Результаты дистанционного зондирования подтверждают вывод о том, что ширина спектра Брэгговских отражений в большей степени зависит от температуры и скорости ветра. Одной из причин образования таких турбулентностей в приземном слое тропосферы могут быть особенности конкретного рельефа местности.

*Ключевые слова:* Брэгговское отражение, спектр флуктуаций, турбулентность, «ангел-эхо».

### ВВЕДЕНИЕ

Отражения от оптически невидимых объектов в тропосфере («ангел-эхо») играют важную роль в интерпретации сигналов с выхода мощных РЛС. Как показывают результаты исследований [1–3], указанные отражения часто образуются из-за возникновения неоднородностей показателя преломления воздуха в турбулентной тропосфере, причем основной вклад дают неоднородности с масштабом порядка половины длины волны (дифракция Брэгга).

Турбулентности могут вызываться различными причинами: сдвигом ветра, термической конвекцией, деформацией воздушных течений горами, распадом гравитационных волн [4] и др. В результате этого в атмосфере постоянно существуют турбулентные вихри разного масштаба и на различных высотах. При этом крупные вихри постепенно распадаются на более мелкие, пока кинетическая энергия вихря не превратится в тепло из-за влияния вязкости.

Это явление может использоваться как дополнительная информация для выявления опасных явлений природы, включая прохождение фронтов гроз, шквалов и сдвига ветра, которые представляют значительную опасность для авиации и наносят ущерб сельскому хозяйству.

Исследования «ангел-эхо» проводились на протяжении длительного времени [2, 3], в основном, в длинноволновой части СВЧ диапазона ( $\lambda \geq 10$  см). Однако, как показывают результаты теоретических исследований [5], мелкомасштабные турбулентности могут иметь размеры до 4 мм и создавать значительные пассивные помехи при работе РЛС на длине волны  $\lambda=8$  мм.

При этом одной из информативных характеристик «ангел-эхо» является энергетический спектр отраженных сигналов, который описывает диссипацию турбулентной энергии при распаде крупных вихрей на более мелкие. Однако опубликованные к настоящему времени работы

содержат результаты спектрального анализа когерентных сигналов, отраженных от ясного неба, в то время как большинство штатных метеорологических РЛС работают в некогерентном режиме.

Поэтому целью настоящей работы является исследование спектральных характеристик некогерентных сигналов, отраженных от мелкомасштабных неоднородностей приземного слоя тропосферы.

### 1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерения характеристик неоднородностей тропосферы использовался аппаратно-программный комплекс [6], в состав которого входит (рис. 1) модернизированный радар типа МРЛ-1 с дополнительным оборудованием, предназначенным для управления ориентацией главного максимума диаграммы направленности (ДН) антенны, калибровки энергетического потенциала радара, расширения динамического диапазона приемного устройства и цифровой обработки принятых сигналов.

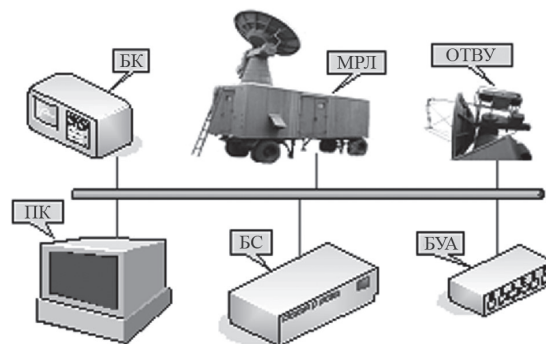


Рис. 1. Радиофизический комплекс для дистанционного зондирования «ангел-эхо»

Комплекс состоит из некогерентного двухчастотного радара МРЛ-1, работающего на дли-

Таблица 1

Параметры радиофизического комплекса

№	Параметр	Канал 3 см
1	Импульсная мощность, кВт	250
2	Длительность импульса, мкс	1
3	Частота повторения, Гц	600
4	Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132
5	Полоса пропускания, МГц	1
6	Линейный динамический диапазон, дБ	45
7	Коэффициент усиления антенны, дБ	46
8	Диаметр антенны, м	3
9	Уровень боковых лепестков, дБ	-21
10	Ширина луча антенны по уровню - 3 дБ, град	0,75
11	Энергетический потенциал, дБ	215
12	Частота дискретизации, МГц	2,5
13	Количество отсчетов в одной ячейке дальности	4
14	Интерфейс связи с ПК	RS-232

нах волн 8 мм и 3,2 см, оптико-телевизионного устройства (ОТВУ) для визуального наблюдения исследуемых объектов, блока управления антенной (БУА), блока калибровки приемного устройства (БК), блока сопряжения (БС) радара с персональным компьютером (ПК). ПК предназначен для управления подсистемами комплекса, а также обработки отраженных сигналов и отображения информации.

Радар включает в себя приемо-передающее устройство с зеркальной антенной диаметром 3 м, блок управления и индикации, а также синхронно-следающий привод для управления положением максимума ДН антенны по азимуту и углу места.

Для визуального наблюдения исследуемых метеорологических объектов на механическом приводе антенны закреплено ОТВУ, оптическая ось которого совмещена с электрической осью антенны. Выход визира подключен к телевизионным мониторам, которые установлены в кабине радара и рядом с ПК. На экране монитора формируется оптическое изображение метеорологических объектов с пространственным разрешением в режиме широкого (6 угл. град.) и узкого (1 угл. град.) поля зрения, что дает возможность координировать работу операторов ПК и радара при проведении измерений.

Блок управления антенной предназначен для сканирования лучом антенны в соответствии с заданным оператором режимом, а блок калибровки обеспечивает формирование импульсного СВЧ-сигнала эталонной мощности для измерения энергетического потенциала радара.

Блок сопряжения предназначен для формирования импульсов запуска передающего устройства радара, управления положением антенны по азимуту и углу места, а также преобразования отраженных сигналов с выхода радара в цифровую форму с последующей обработкой в персональном компьютере.

Основные характеристики радара и системы обработки сигналов приведены в таблице 1.

## 2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В работе [7] приведены результаты исследования отражения сигналов 3-см диапазона, обусловленные объемным рассеянием от локально-изотропных неоднородностей в случае, когда метеорологические образования оптически не наблюдались. На рис. 2 представлен пример радиолокационного изображения подобных отражений на экране монитора ПК в координатах «высота-дальность» при сканировании антенны МРЛ по углу места.

Одновременно с дистанционным зондированием проводилось визуальное наблюдение за состоянием тропосферы в районе проведения эксперимента. При этом высота насекомых, птиц и аэрозолей не превышает 600 м, в то время

как отражения сигналов наблюдались на высотах до 2–3 км. Это позволило сделать вывод о том, что отражение сигналов обусловлено, в основном, неоднородностями показателя преломления тропосферы.

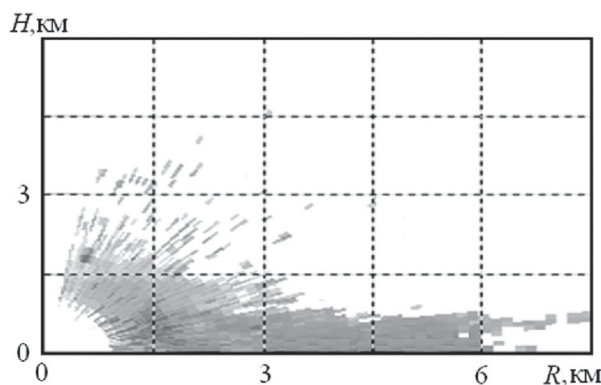


Рис. 2. Радиолокационное изображение объемного рассеяния в тропосфере («высота-дальность»)

Кроме того, как было показано в [7], отражения имеют статистическую природу и сильно флуктуируют во времени. При этом сигналы с выхода некогерентной РЛС содержат постоянную составляющую и флуктуационную компоненту  $U(t) = U_0 + \Delta U(t)$ , что видно из рис. 3, где показан пример временной структуры нормированного сигнала, отраженного от объемного рассеивателя, находящегося на дальности ~2,85 км.

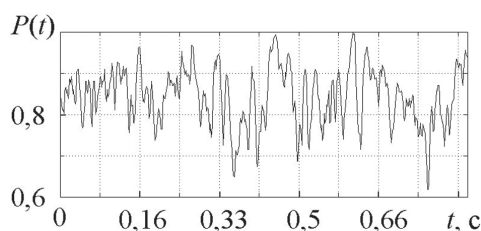


Рис. 3. Временная структура отраженных сигналов

Энергетический спектр такого сигнала можно представить в виде суммы двух составляющих

$$S(\omega) = S_1(\omega) + S_2(\omega), \quad (1)$$

где 
$$S_1(\omega) = \frac{1}{T} \left| \int_0^T U_0 e^{-j\omega t} dt \right|^2 = T \cdot U_0^2 \left[ \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \right]^2; \quad (2)$$

$$S_2(\omega) = \left| \int_0^T \Delta U(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2; \quad (3)$$

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $T$  – длительность реализации.

Первое слагаемое в (1) представляет собой спектр постоянной составляющей (2), амплитуда которой существенно превышает флуктуационную компоненту (3). Поэтому полный спектр  $S(\omega)$  – рис. 4 содержит в начале координат пик значительной амплитуды шириной  $\Delta f \approx T^{-1}$ , который в значительной мере маскирует информацию о спектре флуктуаций показателя преломления в тропосфере.

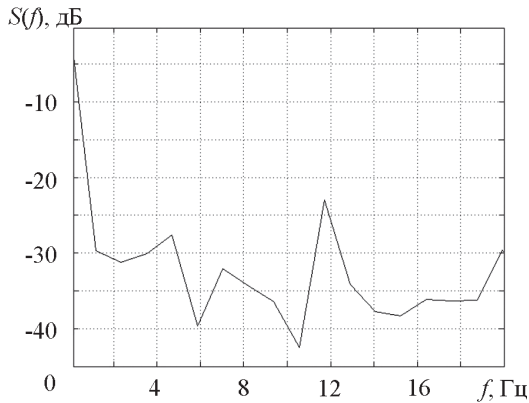


Рис. 4. Спектр сигналов, отраженных от мелкомасштабных неоднородностей в тропосфере

В то же время, если из полного сигнала вычесть его постоянную составляющую  $\Delta U(t) = U(t) - U_0$ , то полученный при этом энергетический спектр флуктуаций  $S_2(\omega)$  полностью относится к флуктуирующей составляющей отраженного сигнала (рис. 5, время реализации – 0,83 с).

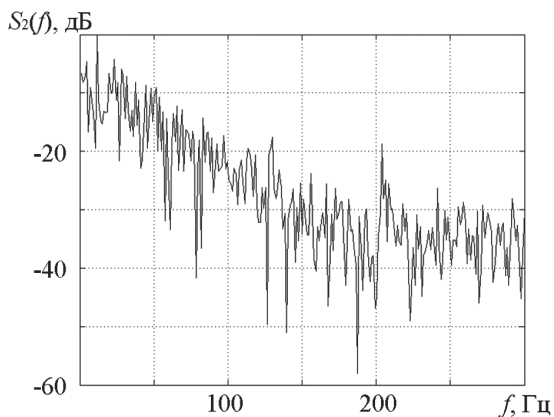


Рис. 5. Энергетический спектр флуктуаций сигнала, отраженного от неоднородностей тропосферы

В силу стохастического характера принятых сигналов их спектр отличается сильной изрезанностью, поэтому в работе использовалось усреднение по ансамблю реализаций  $N_r$ . Здесь важно установить необходимое для усреднения количество реализаций. На рис. 6 приведен вид энергетического спектра в зависимости от количества усредняемых реализаций. Видно, что при  $N_r > 80$  спектр флуктуаций становится достаточно гладким.

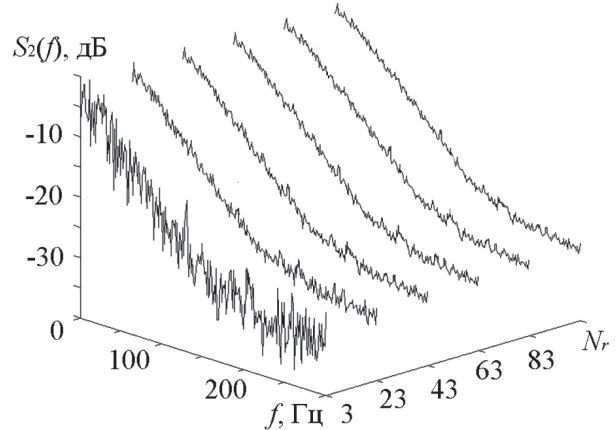


Рис. 6. Влияние количества усредняемых реализаций на энергетический спектр

На рис. 7 приведен пример энергетического спектра флуктуаций, усредненного по ансамблю из 100 реализаций, который позволяет оценивать информативные параметры спектра, в частности его ширину.

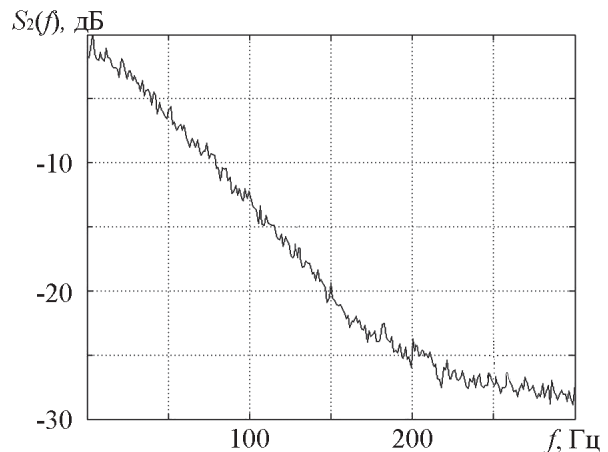


Рис. 7. Энергетический спектр флуктуаций сигнала, усредненный по 100 реализациям

На рис. 8 представлены данные о нормированных значениях ширины спектра мелкомасштабных флуктуаций и метеопараметров, полученные в каждом из проведенных экспериментов. По горизонтальной оси отложен порядковый номер эксперимента. При этом максимальные значения измеренных характеристик составляют: для ширины спектра  $\Delta f_{\max} = 155,3$ ; температуры воздуха  $T_{\max} = 31,0$ ; влажности  $W_{\max} = 100$ ; давления  $P_{\max} = 757$  и средней скорости ветра  $V = 4,3$ .

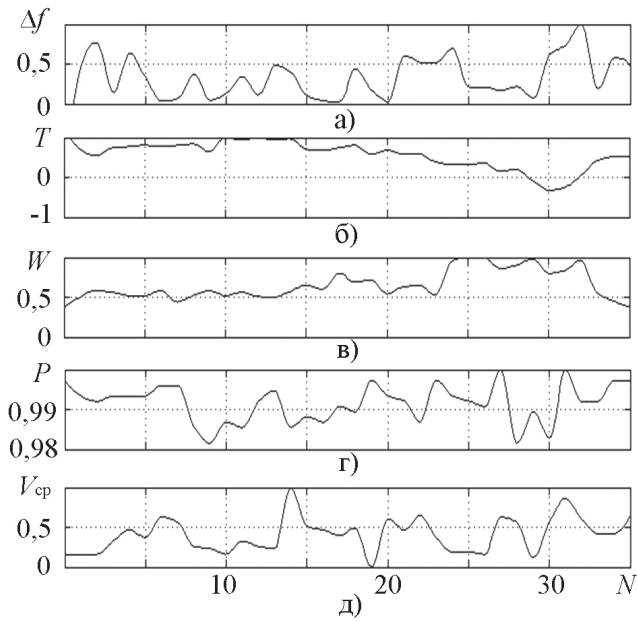


Рис. 8. Ширина спектра мелкомасштабных флуктуаций (а), температура (б), влажность (в), давление (г), средняя скорость ветра (д)

При этом метеопараметры измерялись вблизи поверхности в отличие от спектральных характеристик флуктуаций тропосферы, что, безусловно, сказывается на надежности сопоставления этих характеристик. Тем не менее, представляет интерес оценить статистическую связь ширины спектра флуктуаций с метеорологическими параметрами приземного слоя тропосферы.

В табл. 2 приведены результаты вычисления коэффициента взаимной корреляции между шириной спектра флуктуаций отраженных сигналов и температурой, влажностью, давлением и средней скоростью ветра (столбцы 1–4 соответственно).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции ширины спектра и метеопараметров

Коэффициенты корреляции			
$K(\Delta f, T)$	$K(\Delta f, W)$	$K(\Delta f, P)$	$K(\Delta f, V_{cp})$
-0,33	0,1	0,16	0,18

Невысокие значения коэффициентов корреляции, по-видимому, обусловлены тем, что измерения метеопараметров и спектральных характеристик проводились на разных высотах. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что ширина спектра флуктуаций в большей степени определяется температурой и средней скоростью ветра (коэффициенты корреляции соответственно равны -0,33 и 0,18), в то время как влияние влажности и давления несколько меньше.

На рис. 9 представлены результаты измерений ширины спектра флуктуаций отраженных сигналов на разной наклонной дальности вдоль луча РЛС при его ориентации под углом места 10 градусов.

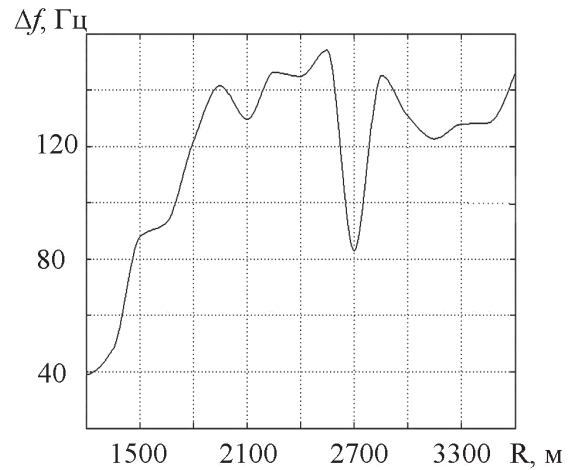


Рис. 9. Ширина спектра флуктуаций отраженных сигналов на разных дальностях

Можно предположить, что исследованная мелкомасштабная турбулентность обусловлена термическими и орографическими причинами (образование турбулентных вихрей на неоднородностях профиля подстилающей поверхности), что косвенно подтверждается профилем местности, над которой производились измерения (рис. 10,  $H$  – высота относительно антенны МРЛ,  $L$  – дальность). Холмистый характер местности способствует образованию атмосферных неоднородностей под воздействием ветра [5], что отражается на параметрах флуктуации отраженных сигналов.

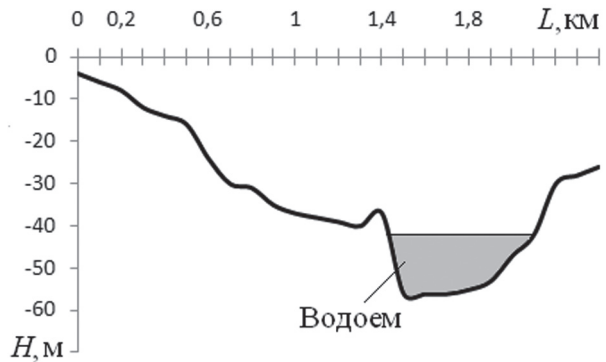


Рис. 10 Высотный профиль трассы

При этом план местности в направлении излучения включает в себя преимущественно одиночные деревья с кустарником и редкие строения (рис. 11), включая высоковольтную линию электропередач (ЛЭП) и объекты городской энергетики, которые при работе выделяют значительное количество тепла. Это, по-видимому, приводит к нагреву приземного слоя и формированию восходящих конвективных потоков воздуха.

С другой стороны, наличие озера, в принципе, также способствует образованию турбулентных вихрей, однако, необходимо отметить, что «ангел-эхо» в описанном районе наблюдались не только в теплое время года (весна-лето), но и в осенне-зимний период.





Рис. 11. План местности

Поэтому можно предположить, что в данном случае образованию «ангел-эхо» способствует как термическая конвекция так и орографический фактор.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Модернизирован радиофизический комплекс на основе метеорологического радара типа МРЛ-1 в части увеличения чувствительности и калибровки приемного устройства, а также системы обработки отраженных сигналов. Это позволило проводить исследования амплитудных флуктуаций сигналов, отраженных от мелкомасштабных неоднородностей тропосферы («ангел-эхо»), которые возникают из-за изменения показателя преломления воздуха.

2. Проведен годичный цикл экспериментальных исследований отражений от мелкомасштабной турбулентности тропосферы совместно с наблюдением метеоданных. Наибольшее влияние на ширину спектра флуктуаций оказывает температура воздуха и скорость ветра.

3. На основе анализа профиля местности, над которой проводились исследования, сделано предположение о ведущей роли термического и орографического факторов при формировании неоднородности в приземном слое тропосферы.

### Литература

- [1] *Ottersten Hans*. Atmospheric structure and radar backscattering in clear air // *Radio Science*, vol. 4, N 12, 1969. – P. 1179–1193.
- [2] *James P.K.* A review of radar observations of the troposphere in clear conditions // *Radio Science*, vol. 15, N 2, 1980. – P. 151–175.
- [3] *Чедуик Р., Госсард Э.Э.* Радиолокационное дистанционное зондирование ясного неба: обзор тр. Ин-

та инж. по электротехнике и радиоэлектронике // ТИИЭР, т. 71, № 6, 1983. – С. 59–78.

- [4] *Татарский В.Н.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
- [5] *Воронцов В.А.* Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 295 с.
- [6] *Белов Е.Н., Войтович О.А., Макулина Т.А., Руднев Г.А., Хоменко С.И., Хлопов Г.И.* Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеобразований // *Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова.* – Харьков, 2009. – 14, №1. – С. 57–63.
- [7] *Е.Н. Белов, О.А. Войтович, Г.А. Руднев, Т.А. Ткачева, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко.* Радиолокационное зондирование мелкомасштабной турбулентности в пограничном слое атмосферы // *Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова.* – Харьков, 2012. – 3, № 1. – С. 30–35.

Поступила в редколлегию 22.07.2013



**Белов Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, научный сотрудник отдела физических основ радиолокации. Научные интересы: практика создания радиолокационных систем.



**Войтович Олег Антонович**, кандидат технических наук, доцент, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, старший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации. Научные интересы: дистанционное зондирование атмосферы.



**Зацеркляная Анна Витальевна**, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, инженер отдела физических основ радиолокации. Научные интересы: изучение спектральных характеристик отражений от метеобъектов.



**Руднев Геннадий Алексеевич**, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, младший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации. Научные интересы: спектральная обработка радиолокационных сигналов.



**Хлопов Григорий Иванович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, заведующий отделом физических основ радиолокации. Научные интересы: теория и практика создания радиотехнических систем.



**Хоменко Станислав Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, старший научный сотрудник отдела физических основ радиолокации. Научные интересы: распространение радиоволн.

УДК 551.508.85.9

**Спектр флуктуацій некогерентних сигналів, відбитих від малорозмірних неоднорідностей тропосфери** / Є.М. Белов, О.А. Войтович, А.В. Зацеркляна, Г.О. Руднев, Г.І. Хлопов, С.І. Хоменко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2013. — Том 12. — № 3. — С. 417–422.

Викладено результати дослідження спектрів флуктуацій некогерентних сигналів, відбитих від дрібномасштабних неоднорідностей тропосфери. Експерименти проводилися протягом року. Результати дистанційного зондування свідчать про те, що ширина спектра Бреґівського відбиття найбільше залежить від температури та швидкості вітру. Причиною створення

таких турбулентностей у приземному шарі тропосфери можуть бути особливості конкретного рельєфу місцевості.

*Ключові слова:* Бреґівське відбиття, спектр флуктуацій, турбулентність, «ангел-ехо».

Іл.: 11. Табл.: 02. Бібліогр.: 7 найм.

UDK 551.508.85.9

**Spectrum of fluctuations of incoherent signals reflected from small dimensions troposphere inhomogeneities** / Ye.N. Belov, O.A. Voitovich, A.V. Zatserklyanaya, G.A. Rudnev, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2013. — Vol. 12. — № 3. — P. 417–422.

The results of one-year experimental study of fluctuations spectra of incoherent signals, reflected from small scale irregularities of the troposphere are given. The results of remote sensing show that the spectrum width of Bragg reflections mainly depend on the wind speed. The peculiarities of a terrain profile may be one of the causes of such turbulences in the surface layer of the troposphere.

*Keywords:* Bragg reflection, spectrum of fluctuations, turbulence, «angel-echo».

Fig.: 11.Tab.: 02. Ref.: 7 items.