

М. Г. Балан, В. А. Зуйков, В. Б. Разказовский, Н. Г. Резниченко

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ОСАДКОВ  
В 8-ММ ДИАПАЗОНЕ

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [vadimr@ire.kharkov.ua](mailto:vadimr@ire.kharkov.ua)

Приводятся результаты экспериментального изучения доплеровских спектров радиолокационных отражений от дождя и снегопада в 8-мм диапазоне радиоволн при горизонтальном и наклонном зондировании когерентно-импульсными сигналами. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** осадки, радиолокационные отражения, спектры.

Интерес к изучению доплеровских спектров радиолокационных отражений от осадков, в первую очередь от дождей, связан с двумя прикладными задачами. Исторически первой, ставшей актуальной с момента начала освоения радиолокацией см, а затем мм диапазонов волн, является задача оценки влияния отражений от осадков как пассивной маскирующей помехи и поиск путей ослабления ее негативного действия на характеристики обнаружения целей различных классов [1, 2]. Второй задачей, решению которой уделяется большое внимание в последние десятилетия, является дистанционная диагностика движения воздушных масс в тропосфере [3, 4] и уточнение представлений о свойствах первичных рассеивателей радиоволн: дождевых капель, града и снежинок [5].

В данной работе доплеровские спектры отражений от осадков исследуются в условиях, соответствующих радиолокационному наблюдению объектов на земной поверхности либо на небольших, до 200 м, высотах над ней. Получаемые в таких условиях спектры позволяют, с одной стороны, оценивать влияние радиолокационных отражений от осадков на характеристики систем селекции движущихся целей, а с другой, – служат источником информации о скорости и неоднородности приземного ветра, знание которых является одной из составляющих обеспечения безопасности воздушного движения на этапах посадки и взлета. В отличие от большинства предшествующих исследований, нами ставилась задача получения не усредненных за значительные промежутки времени спектров, а оценка их нестационарности (изменчивости за короткое время) и влияние на эту характеристику высоты отражающего объема над поверхностью.

**Методика и результаты исследований.**

Изучение доплеровских спектров радиолокационных отражений от осадков проводилось с использованием измерительного радиолокационного устройства, основой которого являлся коге-

рентный приемо-передающий полупроводниковый модуль [6] 8-мм диапазона. В нем осуществлялось генерирование стабилизированных по частоте кварцем импульсных сигналов, их когерентный прием и синхронное детектирование. Длительность импульсов составляла 0,1 мкс при мощности около 20 Вт и частоте повторения 20 кГц. Зеркальная приемо-передающая антенна радиолокатора имела игольчатую диаграмму направленности шириной около 0,8° при уровне первых боковых лепестков менее 26 дБ. Поворотное устройство, на котором была установлена антенна, позволяло изменять ее ориентацию по азимуту и углу места с фиксацией последнего при значениях 0, 10 и 20°.

С выхода синхронного детектора биполярные импульсы с выбранной дальности поступали на расширитель (пик-детектор со сбросом) и фильтр нижних частот с граничной частотой 5 кГц. Напряжение квазигармонического сигнала оцифровывалось с частотой выборок 100 кГц, и данные записывались в память персонального компьютера. Каждый сеанс записи при неизменном положении антенной системы, задержке селекторного импульса по дальности и коэффициенте усиления приемника имел длительность 5 с. После этого запись либо повторялась, либо производилась при измененных начальных условиях. Основные результаты были получены при записи отраженного сигнала с дальности 600 м. Такая дальность была выбрана исходя из того, что, во-первых, при этом отсутствовали мешающие отражения от строений и деревьев как по главному, так и по ближним боковым лепесткам; во-вторых, интенсивность отраженного от осадков сигнала была достаточно высокой даже при слабом дожде и снегопаде. Небольшое количество опытов было проведено как при меньших (примерно до 150 м), так и при больших (до 1 000 м) дальностях. При выбранной дальности 600 м импульсный объем имел форму цилиндра диаметром около 6 м и длиной около 25 м. Изменение угла наклона

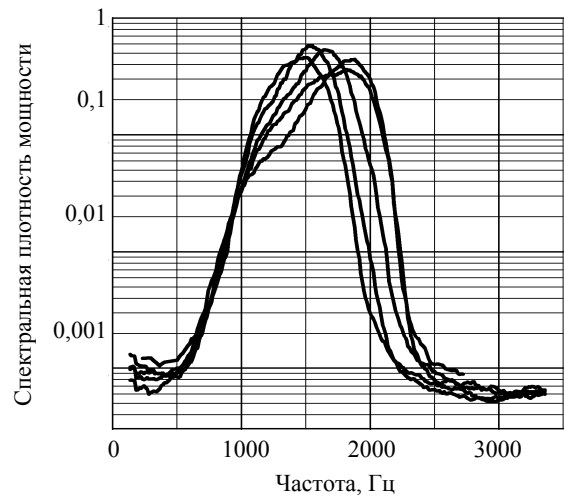
луча антенны позволяло изменять его высоту. Горизонтальному положению оси с учетом высоты места установки радиолокатора соответствовала высота около 20 м, а углам подъема 10 и 20° соответствовали высоты 124 и 225 м.

При статистической обработке исходный массив данных длительностью 5 с делился на 5 подмассивов, а каждый из этих подмассивов в свою очередь на 10 частей длительностью 0,1 с каждая. Числовой массив каждой части центрировался (вычиталось среднее значение), умножался на оконную функцию Хемминга и подвергался быстрому преобразованию Фурье. При дальнейшей обработке и анализе использовались квадраты модулей комплексных амплитуд гармоник спектра. В основном анализировались два вида спектров, получаемых усреднением первичных, что повышало их статистическую устойчивость. Первый представлял собой спектр, усредненный по 10 первичным, относящимся к одному и тому же подмассиву, а второй был результатом усреднения по всему исходному массиву из 5 спектров, т. е. за время 5 с. Визуальное сравнение спектров показало, что, во-первых, характеристики спектров при отражении от дождя и снега существенно отличаются между собой. Во-вторых, даже при отражении от дождей (более стабильном, чем от снега) параметры спектров, их центральная частота и ширина, существенно меняются от опыта к опыту уже в пределах интервалов времени порядка единиц минут, а иногда и за секунды. Следствием этого является уширение усредненного спектра по сравнению с «мгновенными». В качестве примеров на рис. 1, а приведены 5 «мгновенных», т. е. за время около 1 с, спектров, полученных в опыте 30.09.2010 г. при горизонтальной ориентации антенны, а на рис. 1, б – такие же спектры через 10 мин.

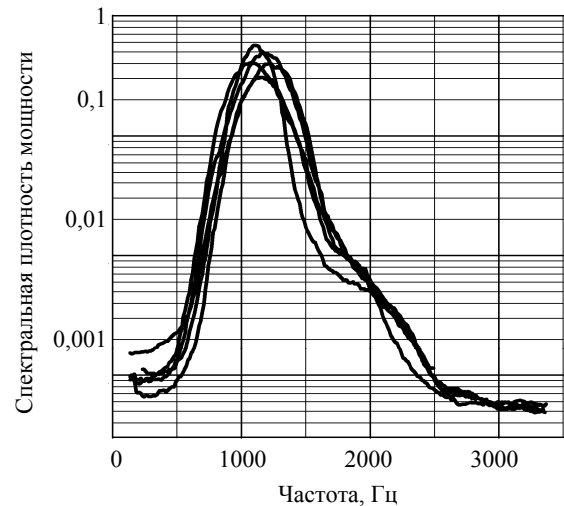
В большинстве опытов наблюдалось сужение спектров при увеличении угла наклона антенны, связанное, по-видимому, с уменьшением степени турбулентности тропосферы при увеличении высоты рассеивающего объема примерно от 20 м при горизонтальном луче до 220 м при подъеме луча на 20°.

Этот эффект четко виден при сравнении рис. 1 (горизонтальный луч) с рис. 2 (подъем луча 10°) и рис. 3 (подъем луча 20°) при разнице во времени менее 10 мин.

Спектры радиолокационных отражений от снегопада имеют сложную, часто многомодальную форму, причем она сильно изменяется даже за время одной записи. Пример такого спектра показан на рис. 4, а. В результате этого усредненный по пяти записям спектр оказывается значительно шире, чем «мгновенные спектры» (рис. 4, б).



а)



б)

Рис. 1. Спектры отражений от дождя при горизонтальной ориентации антенны

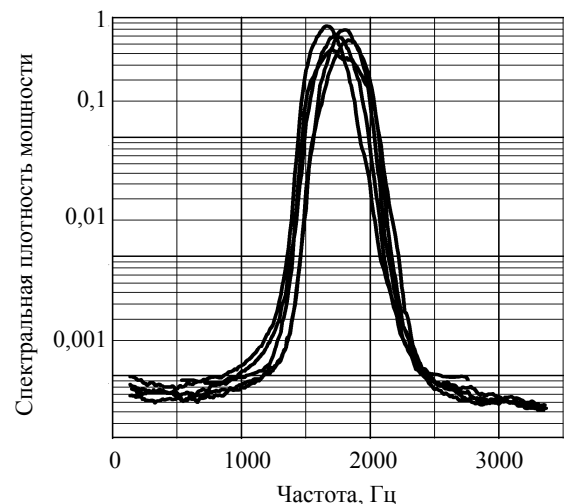


Рис. 2. Спектры отражений от дождя при подъеме луча на 10°

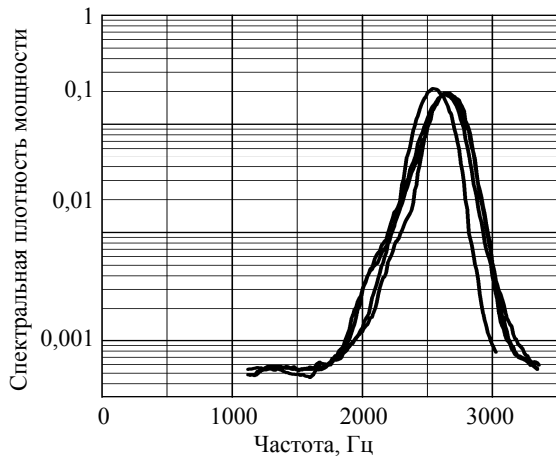


Рис. 3. Спектры отражений от дождя при подъеме луча на 20°

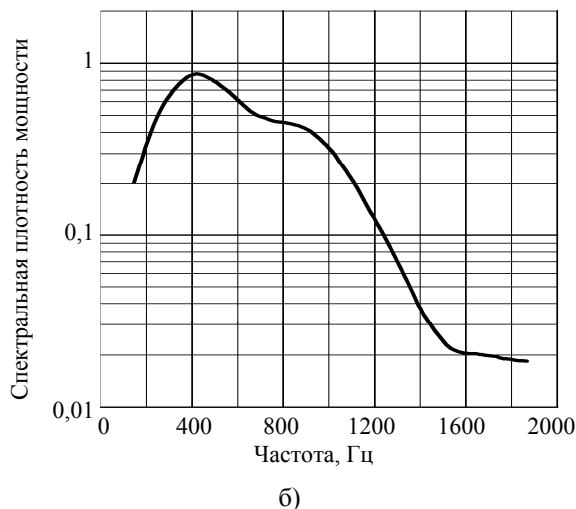
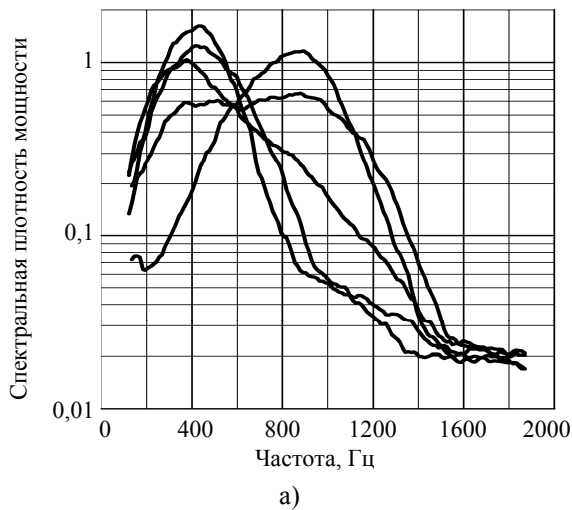


Рис. 4. Спектры отражений от снегопада: а) – «мгновенные»; б) – усредненный

Интенсивность отражений от снега при метеоусловиях, существовавших во время опытов, была существенно (на 10...20 дБ) ниже, чем при наблюдении отражений от дождей в рассмотренных выше опытах.

По мгновенным и усредненным спектрам рассчитывались их центральная частота и эффективная ширина. Для такой обработки были признаны пригодными результаты только двух из восьми проведенных опытов, удовлетворяющие следующим требованиям:

- достаточная амплитуда отраженного сигнала, превышающая не менее чем на 20 дБ уровень внутренних шумов приемника;
- относительное постоянство на протяжении опыта интенсивности дождя, среднего направления и скорости ветра, причем направление и скорость ветра должны были обеспечивать такие значения центральной частоты, при которых эффект «свертывания» спектра незначителен.

Последнее требование обусловлено тем, что в приемнике при синхронном детектировании формировалась только одна квадратурная компонента сигнала. В результате гармоник, соответствующие отрицательным частотам, накладывались на гармоники с такими же положительными частотами.

Центральная частота спектра рассчитывалась как средневзвешенное значение номера гармоники спектра, умноженное на дискрет частоты (1)

$$f_0 = \Delta F \frac{\sum_{m=m_{\min}}^{m_{\max}} m |A(m)|^2}{\sum_{m=m_{\min}}^{m_{\max}} |A(m)|^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta F = 12,2$  Гц – дискрет частоты;  $A(m)$  – комплексная амплитуда гармоники спектра;  $m_{\min}, m_{\max}$  – граничные значения номеров гармоник используемой области спектра.

При амплитудах отраженных сигналов, превышавших внутренние шумы на 30 дБ и более, граничные номера гармоник задавались равными  $m_{\min} = 8$ ,  $m_{\max} = 400$ , которые соответствовали частотам спектра  $F_{\min} = 97,6$  Гц,  $F_{\max} = 4880$  Гц. При этом исключалось влияние низкочастотных гармоник, обусловленных остаточными отражениями от местности, принимаемыми по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, и внутренних шумов, лежащих в области подавления низкочастотного фильтра в канале приемника. При меньших амплитудах отраженного сигнала граничные гармоники выбирались из условия, что амплитуды в используемой области спектра составляют не менее 1/100 их значения в максимуме. Такой выбор границ, как показал анализ, позволил исключить смещение оценок параметров под влиянием «хвостов» спектра.

Второй широко используемой числовой характеристикой спектра является его эффектив-

ная ширина. Нами для расчета был использован вариант ее определения, предложенный, в частности, в работе [7]

$$\Delta f = \frac{\sum_{m=m_{\min}}^{m_{\max}} |A(m)|^2}{|A(m)|_{\max}^2}, \quad (2)$$

где  $|A(m)|_{\max}$  – амплитуда в максимуме спектра.

Анализ результатов расчетов показал, что существует четкая связь центральной доплеровской частоты с углом наклона луча антенны, функциональный вид которой зависит от направления ветрового сноса. Особенно хорошо она проявилась в опыте 30.09.2010 г., который проводился при стабильном направлении и скорости ветра, а также не сильно изменявшейся интенсивности дождя; результаты этого опыта иллюстрирует рис. 5, а, где кружками отмечены значения центральной частоты спектра при горизонтальном положении луча антенны, крестиками – для угла наклона 10°, квадратами – для угла 20°.

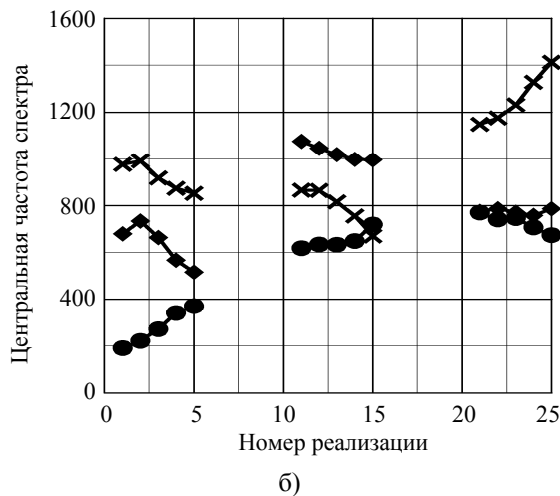
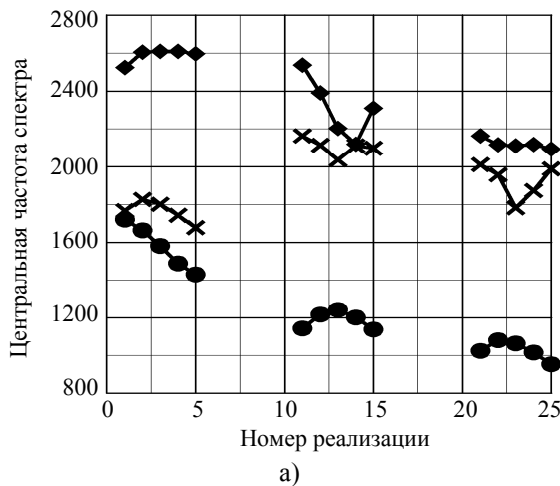


Рис. 5. Зависимости центральной частоты спектра от угла наклона антенны

В опыте 27.10.2010 г. такая зависимость имеет более сложный вид, что обусловлено менее благоприятным направлением ветра относительно линии визирования (рис. 5, б). Эффективная ширина спектра, полученная в упомянутых выше опытах, изменялась примерно в пределах 100...500 Гц; какой-либо четкой зависимости от угла наклона луча не наблюдалось. Область частот, соответствующая эффективной ширине спектра, характеризует действие интенсивной маскирующей радиолокационной помехи. Второй важной характеристикой является ширина области частот, за пределами которой влияние такой помехи можно считать слабым; ее ширину мы обозначили  $\mathcal{F}_{0,01}$ , а границами считали точки пересечения горизонтальной прямой  $|A(m)|^2 = 0,01|A(m)|_{\max}^2$  с огибающей спектра.

Результаты расчета эффективной ширины спектра и ширины по уровню 0,01 от максимума для двух опытов, в которых квадрат амплитуд гармоник спектра более чем на 30 дБ превышал уровень внутренних шумов, а также выполнялись дополнительные требования к форме спектров, упомянутые ранее, приведены в таблице.

Ширина доплеровского спектра радиолокационных отражений от дождя

Номера опытов	Эффективная ширина спектра (Гц) при угле возвышения (°)			Ширина спектра по уровню 0,01 от максимума, Гц		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°
1.1	446	298	190	1393	732	957
1.2	313	206	501	1404	654	642
1.3	322	416	148	1163	1344	593
2.1	505	264	437	1090	645	809
2.2	248	223	165	741	688	629
2.3	312	351	152	853	882	532

Примечание: даты проведения опытов 1.1, 1.2, 1.3 – 30.09.2010 г.; опытов 2.1, 2.2, 2.3 – 27.10.2010 г.

Из таблицы, в частности, видно, что как эффективная ширина спектра, так и его ширина по уровню 0,01 от максимума изменяется от опыта к опыту в сравнительно небольших пределах даже при изменении угла возвышения луча антенн.

**Выводы.** Результаты проведенных опытов позволяют сделать ряд выводов об особенностях доплеровских спектров радиолокационных отражений радиоволн  $K_a$ -диапазона от дождей умеренной интенсивности при горизонтальном и наклонном вверх до 20° направлениях максимума диаграммы направленности:

– в преобладающем большинстве случаев спектр одномодальный и его эффективная ширина составляет 150...500 Гц, причем отсутствует

четко выраженная зависимость ширины спектра от угла подъема луча антенны;

– ширина спектра на уровне 0,01 от значения спектральной плотности мощности в максимуме лежит в пределах примерно 600...1 500 Гц и тоже не зависит от угла подъема луча антенны;

– средняя частота спектра близка к частоте его максимума и при фиксированном положении в пространстве рассеивающего объема ее вариации имеют величину порядка эффективной ширины спектра;

– изменение угла возвышения луча антенны приводит к существенным изменениям частоты максимума, которые могут быть объяснены ветровым сносом капель дождя и изменением направления их облучения.

Относительное постоянство ширины доплеровских спектров отражений от дождя может быть использовано для подавления или частичного ослабления их маскирующего действия. В частности, при применении адаптивного полосового режекторного фильтра с центральной частотой, совпадающей с оценкой средней частоты спектра за время порядка 1 с, при соответствующем выборе полосы заграждения цифрового фильтра можно достичь значительного подавления помех от дождя. Ширина образующейся при этом области «слепых» радиальных скоростей не будет превышать 10...20 км/ч.

1. Currie N. C. Millimeter-wave radar clutter / N. C. Currie, R. D. Hayes, R. N. Trebits. – Boston, L.: Artech House, 1992. – 245 p.
2. Хлопов Г. И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне / Г. И. Хлопов // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон. – 1999. – № 9. – С. 3–27.
3. Yanovsky F. J. Algorithms for Simultaneous Analysis of Differential Doppler Velocity and Doppler Width [Электронный ресурс] / F. J. Yanovsky, D. Glushko // 18<sup>th</sup> Intern. Conf. on Microwave, Radar and Wireless Communications MIKON-2010. – Vilnius, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

4. Коломиец С. Ф. Усовершенствованная методика дистанционного измерения скорости вертикальных воздушных потоков с использованием доплеровского радиолокатора в режиме вертикального зондирования / С. Ф. Коломиец // Современ. проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007: матер. 3-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. – Севастополь: Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2007. – 330 с.
5. Горелик А. Г. Влияние микроструктуры дождя на достоверность и точность определения скорости вертикальных воздушных потоков / А. Г. Горелик, С. Ф. Коломиец // Успехи современной радиоэлектрон. – 2006. – № 11. – С. 16–27.
6. Зуйков В. А. Приемно-передающий радиолокационный модуль миллиметрового диапазона длин волн / В. А. Зуйков, Г. И. Ключко, М. В. Колисниченко и др. // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 3. – С. 15–18.
7. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1966. – 728 с.

М. Г. Балан, В. А. Зуйков,  
В. В. Разсказовский, Н. Г. Резниченко

#### FEATURES OF SPECTRA OF RADAR REFLECTIONS FROM PRECIPITATION IN THE $K_u$ -BAND

The results of experimental study of Doppler spectra of radar reflections from rain and snowfall in  $K_u$ -band for horizontal and oblique sounding by coherent-pulsed signals are presented.

**Key words:** precipitation, radar reflection, spectrum.

М. Г. Балан, В. О. Зуйков,  
В. Б. Разсказовський, М. Г. Резніченко

#### ОСОБЛИВОСТІ СПЕКТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВІДБИТТІВ ВІД ОПАДІВ У 8-ММ ДІАПАЗОНІ

Приведено результати експериментального вивчення доплерівських спектрів радіолокаційних відбиттів від дощу та снігопаду у 8-мм діапазоні радіохвиль при горизонтальному та похилому зондуванні когерентно-імпульсними сигналами.

**Ключові слова:** опади, радіолокаційні відбиття, спектри.

*Рукопись поступила 30.06.11 г.*