

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ, ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.396:681.34

*В.В. НАУМЕНКО, канд. техн. наук, А.В. ТОЦКИЙ, д-р техн. наук,  
Г.И. ХЛОПОВ, д-р техн. наук, О.А. ВОЙТОВИЧ, канд. техн. наук*

## КЛАССИФИКАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОЦЕНИВАНИЯ БИКОГЕРЕНТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

### Введение

Оперативная и надежная метеорологическая информация служит одной из главных составляющих, необходимых для обеспечения безопасности полетов в современной авиации. Для наблюдения за состоянием атмосферы и обеспечения пользователей необходимыми метеорологическими данными широко используются РЛС метеорологического назначения – МРЛ. Радиолокационные методы исследования метеобразований основаны на обратном рассеянии электромагнитных волн частицами облаков и осадков. Пространственно распределенные многочисленные источники обратного рассеяния в облаке создают вклад в суммарный отраженный радиолокационный сигнал. Параметры данного сигнала несут метеорологическую информацию об атмосферных образованиях. Решение задачи классификации основных типов облаков осуществляется с использованием определенных радиолокационных признаков [1 – 3].

Опасные явления в атмосфере, такие как прохождение фронтов гроз, шквалы, сдвиги ветра, являются по статистике причиной приблизительно 70 % авиакатастроф. Турбулентное движение воздушных потоков, в отличие от ламинарного движения, характеризуется непостоянством поля скоростей и наличием так называемых турбулентных вихрей, приводящих к перемешиванию воздушных потоков. Атмосферная турбулентность вызывает резкое перемещение воздушного судна в вертикальной плоскости, получившее название болтанки. В результате болтанки затрудняется пилотирование, возникают дополнительные нагрузки на элементы конструкции воздушного судна, что может привести к его разрушению. Поэтому надежное выявление опасных турбулентных зон представляется важной задачей для современной авиационной радиометеорологии.

Для определения типа облачного образования в ряде случаев достаточно использовать ширину энергетического спектра радиолокационного сигнала обратного рассеяния. При этом можно предположить, что степень турбулентности облаков пропорциональна ширине энергетического спектра. Однако эта величина определяется не только турбулентностью [4], а также зависит от многих факторов, включая боковой ветровой снос, наличие осадков и др.

Для повышения надежности распознавания турбулентных и ламинарных метеобразований необходимо искать новые информативные признаки, которые содержатся в сигналах обратного рассеяния. К таким признакам относятся пространственно-временные частотно-фазовые связи. Указанные частотно-фазовые связи могут быть обусловлены, например, особенностями физической природы процессов, протекающих в турбулентных образованиях.

Для выявления отмеченных фазовых связей в настоящей статье предлагается использовать аппарат биспектрального анализа, успешно применяющийся в последние годы при обработке радиолокационных данных [5 – 7].

При оценке спектральной плотности мощности формируют распределение энергии частотных компонент, содержащихся в обрабатываемом сигнале. Информация, содержащаяся в оценке спектральной плотности, достаточна для исчерпывающего статистического описания

гауссова процесса, однако полезные данные о фазовых связях между спектральными компонентами при этом утрачиваются.

В МРЛ часто возникают задачи обработки случайных процессов с неизвестной плотностью распределения вероятности, отличающейся от нормального закона, когда наличие фазовых связей в результатах наблюдений и отличие закона распределения от нормального являются единственно возможными источниками информации. Поэтому известные энергетические методы оценивания спектральной плотности, при использовании которых безвозвратно теряется информация о фазовых связях частотных компонент и отсутствует различительный признак сигналов в виде отличий их законов распределения плотности вероятности, не позволяют решать ряд практически важных задач обнаружения, различения сигналов, распознавания типов метеообразований и их классификации.

Методы полиспектрального анализа [5] обеспечивают: различение сигналов на уровне отличий их законов распределения, выделение полезного негауссова сигнала на фоне гауссовой помехи и дают возможность извлечь важную информацию о *когерентных связях пар спектральных компонент* в наблюдаемом процессе, безвозвратно утерянную при оценке энергетического спектра.

Предлагаемый авторами подход основан на предположении, что радиолокационный сигнал обратного рассеяния может содержать взаимосвязанные спектральные составляющие, то есть фазовые или когерентные связи. Эти фазовые связи спектральных компонент содержат новые информативные признаки для распознавания, различения и классификации турбулентных и ламинарных воздушных потоков и зон в атмосфере. В качестве нового информативного признака предлагается использовать оценивание поведения бикогерентности [8] радиолокационных сигналов обратного рассеяния на метеообразованиях.

Таким образом, цель настоящей работы – во-первых, экспериментальное исследование новых подходов и стратегии мониторинга окружающей среды на основе бикогерентных характеристик сигналов, отраженных от метеообразований, и, во-вторых, выявление опасных для воздушного судна зон для повышения качества метеорологических предсказаний.

### 1. Стратегия биспектральной обработки сигналов

Моментная функция третьего порядка и ее преобразование Фурье – биспектр широко используются в цифровой обработке сигналов при решении задач обнаружения и восстановления негауссовых процессов, наблюдаемых в аддитивном гауссовом шуме, а также распознавания образов и различения сигналов в системах радиолокации, астрономии, обработки биомедицинских сигналов и других приложениях [5 – 7]. Метод биспектрального анализа позволяет выявить в наблюдении такие зависимости и свойства, которые невозможно определить, используя традиционные статистики второго порядка – корреляционную функцию и спектральную плотность мощности. К достоинствам метода биспектральной обработки сигналов относятся возможность выявления и оценивания фазовых взаимосвязей спектральных компонент, высокая помехоустойчивость по отношению к аддитивному гауссову шуму и инвариантность к случайным задержкам сигнала.

Биспектральная плотность – это 3-D комплексная функция двух частотных переменных. В дискретном представлении биспектр  $B_x(p, q)$  может быть определен как двумерное дискретное преобразование Фурье (ДПФ) корреляционной функции третьего порядка  $R_x(k, l)$  как

$$B_x(p, q) = \sum_k \sum_l R_x(k, l) \exp\{-j2\pi(kp + lq)\} \quad (1)$$

или

$$B_x(p, q) = \left\langle X^{(m)}(p) X^{(m)}(q) X^{(m)}(p+q) \right\rangle_{M \rightarrow \infty} \quad (2)$$

где  $B_x(p, q) = |B_x(p, q)| \exp[j\gamma_k(p, q)]$ ;  $|B_x(p, q)|$  и  $\gamma_k(p, q)$  – биамплитуда и бифаза соответственно;  $p$  и  $q$  – частотные индексы;  $X^{(m)}(\dots)$  – ДПФ произвольной  $m$ -й наблюдаемой реализации

$\{x^{(m)}(i)\}$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $R_x(k, l) = \langle \sum_i x^{(m)}(i)x^{(m)}(i-k)x^{(m)}(i-l) \rangle_{M \rightarrow \infty}$  — корреляционная функция

третьего порядка;  $\langle \dots \rangle$  — осреднение по ансамблю из  $M$  реализаций.

Биспектр вида (1) или (2) можно интерпретировать как *меру степени взаимодействия (взаимосвязи) трех волн (трех колебаний) на частотах:  $p$ ,  $q$  и их сумме  $p + q$* .

Согласно правилам математической статистики *бикогерентность  $b^2(p, q)$*  [8] получают с помощью статистического осреднения оценок биспектра и нормирования результата осреднения в виде

$$b^2(p, q) = \frac{|\langle B(p, q) \rangle|^2}{\langle |X(p+q)|^2 \rangle \langle |X(p)X(q)|^2 \rangle} \quad (3)$$

*Бикогерентность  $b^2(p, q)$*  вида (3) может быть интерпретирована как возведенная в квадрат нормированная версия биспектра. Безразмерная величина бикогерентности меняется в пределах от нуля до единицы, т.е.  $b^2(p, q) \in [0, 1]$ . Итак, по определению, принятому в статистическом анализе, бикогерентность — это величина, которая служит *количественной мерой оценки фазовых взаимосвязей в наблюдаемом сигнале некогерентной МРЛ*.

Оценка бикогерентности позволяет не только описать статистические характеристики наблюдаемого процесса более точно и более глубоко, чем при традиционном подходе, но и дает возможность обнаруживать и извлекать новые информативные признаки, содержащиеся в обрабатываемых данных. Эти информативные признаки могут существовать в виде фазовых связей между парами компонент Фурье спектра, содержащимися в радиолокационном сигнале обратного рассеяния.

Если радиоволны, рассеиваемые объемно-распределенным *турбулентным* опасным метеообразованием, статистически независимы, то все фазы сигналов обратного рассеяния являются случайными независимыми величинами и оценка бикогерентности (3) стремится к нулю. У радиоволн, рассеиваемых объемно-распределенным *ламинарным* безопасным метеообразованием, в сигналах обратного рассеивания присутствуют фазовые связи, и оценка бикогерентности (3) стремится к единице.

Таким образом, главное отличие биспектра от энергетического спектра состоит в сохранении фазовой информации и возможности извлекать эту информацию в качестве отличительного признака распознавания опасных и безопасных метеообразований. Биспектральная обработка сигналов позволяет извлекать новую информацию для решения задач обнаружения, а также определения степени опасности метеообразования для воздушных судов.

## 2. Оборудование для экспериментальных исследований

Для измерения характеристик метеообъектов использовался аппаратно-программный комплекс [9], в состав которого входит 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).

Комплекс состоит из некогерентного радара МРЛ-1, работающего на длине волны 3,2 см; оптико-телевизионного визуального 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 приемно-передающее устройство с зеркальной параболической антенной диаметром 3 м, блок управления и индикации, а также синхронно-следающий привод для управления положением главного максимума ДН антенны по азимуту и углу места.

Для визуального наблюдения исследуемых метеорологических объектов ОТВУ закреплено на механическом приводе антенны, а его оптическая ось 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 ( $6^0$ ) и узкого ( $1^0$ ) поля зрения, что дает возможность координировать работу операторов ПК и радара при проведении измерений.

БУА предназначен для сканирования ДН антенны в соответствии с заданным оператором режимом, а БК обеспечивает формирование импульсного СВЧ-сигнала эталонной мощности для измерения энергетического потенциала радара в процессе измерений.

БС предназначен для формирования импульсов запуска, передачи сигналов управления положением антенны по азимуту и углу места, а также преобразования отраженных сигналов с выхода радара в цифровую форму с последующей обработкой в ПК. Основные характеристики радара и системы обработки сигналов приведены в табл. 1.

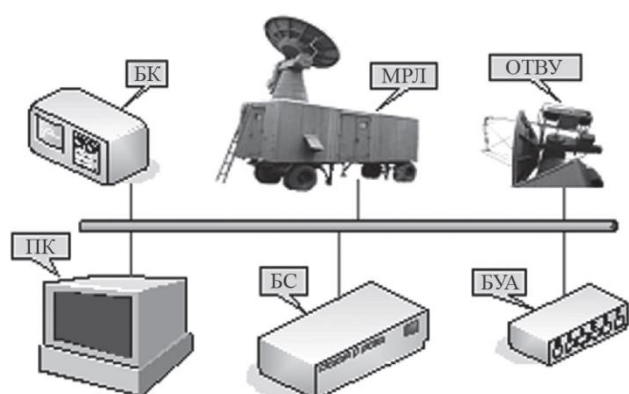


Рис. 1. Радиофизический комплекс для дистанционного зондирования метеорообразований

Таблица 1

№	Параметр	Значение
1	Импульсная мощность, кВт	250
2	Длительность импульса, мкс	1
3	Частота повторения импульсов, Гц	600
4	Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132
5	Линейный динамический диапазон, дБ	45
6	Коэффициент усиления антенны, дБ	46
7	Уровень боковых лепестков, дБ	-21
8	Ширина ДН антенны по уровню - 3 дБ, град	0,75
9	Интерфейс связи с ПК	RS-232

### 3. Обработка данных радиолокационного зондирования метеорообразований

На рис. 2 представлен пример радиолокационного изображения неоднородностей на экране монитора ПК в координатах «высота ( $H$ )-дальность ( $R$ )» при сканировании луча антенны МРЛ по углу места.

В работе [10] приведены результаты экспериментальных исследований объемного рассеяния на локально-изотропных неоднородностях атмосферы, полученные с помощью МРЛ-1 для случая, когда метеорологические образования оптически не наблюдались. Одновременно с дистанционным зондированием проводилось визуальное наблюдение за состоянием тропосферы в районе проведения эксперимента. В силу стохастического характера эхосигналов их спектральная плотность мощности отличается сильной изрезанностью. Поэтому, для сглаживания спектральной плотности мощности в [10] использовалось осреднение данных по ансамблю реализаций. После процедуры оцифровки и осреднения для каждой ячейки дальности было получено 512 отсчетов сигнала обратного рассеяния, которые используются для расчетов оценок спектральной плотности и бикогерентности. Пример реализации сигнала обратного рассеяния  $x^{(m)}(i)$  представлен на рис. 3.

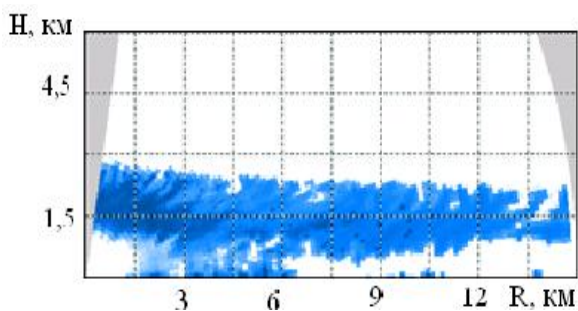


Рис. 2. Радиолокационное изображение объемного рассеяния в тропосфере в координатах («высота-дальность») для облаков нижнего яруса при отсутствии осадков

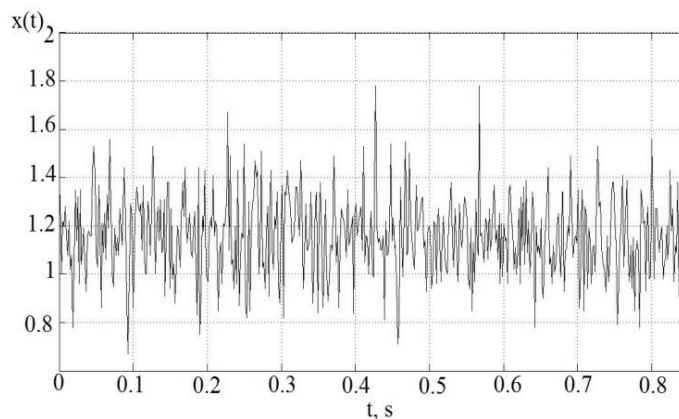


Рис. 3. Пример принятого сигнала во временной области

Алгоритм обработки данных МРЛ предполагает такие этапы:

1. *Центрирование* радиосигнала обратного рассеяния:

$$x_c(i) = x^{(m)}(i) - \bar{x},$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение сигнала  $x^{(m)}(i)$ .

2. *Фильтрация*: для устранения аномальных выбросов в принятом сигнале использовался  $\alpha$  – урезанный медианный фильтр.

3. Вычисление Фурье-спектра сигнала  $\dot{X}(j)$ : проводилось с использованием БПФ.

4. Вычисление биспектра (2) и бикогерентности (3) принятого сигнала.

Расчет сглаженной оценки бикогерентности для фиксированной ячейки дальности проводился с помощью осреднения по 8 сегментам из 64 отсчетов каждый с 50 %-м перекрытием. Дополнительное сглаживание оценки бикогерентности выполнялось во временной области: при фиксированном угле места, равном  $10^\circ$ , проводилось осреднение по 100 наблюдениям с шагом, равным 0,85 с. Полный интервал времени, используемый для расчета оценки бикогерентности, равнялся  $100 \times 0,85 = 85$  с.

В качестве примера для решения задачи обнаружения и различения типа метеообразования исследовались слоисто-кучевые (Sc) не просвечивающиеся (Sc op.), просвечивающиеся (Sc trans.), кучево-дождевые (Cu) и слоисто-дождевые (Ns) облака [11]. Решение о принадлежности метеообразования к ламинарному или турбулентному типу принимается по критерию превышения оценки бикогерентности априорно заданного порога. В случае, когда количество отсчетов оценки бикогерентности не превышает заданный порог, решение принимают в пользу опасного турбулентного метеообразования. Если достаточно большое количество отсчетов оценки бикогерентности превышает заданный порог, то решение принимают в пользу принадлежности метеообразования к классу безопасных ламинарных зон. Задавались два пороговых значения – 0,7 и 0,5.

Следует отметить, что на всех графиках, приведенных ниже, присутствуют всплески на частотах, кратных 50 Гц, что обусловлено частотой переменного тока в сети электропитания.

На рис. 4, а и 5, а представлены результаты расчетов спектральной плотности мощности эхо-сигналов при ориентации луча МРЛ-1 под углом места  $10^\circ$  для наклонных дальностей 3750 и 5100 м соответственно, а на рис. 4, б и 5, б их оценка бикогерентности. На уровне – 3 дБ на всех на графиках, которые приводятся ниже, отмечена ширина спектра отраженных сигналов. Пунктирной линией отмечено ее среднее значение.

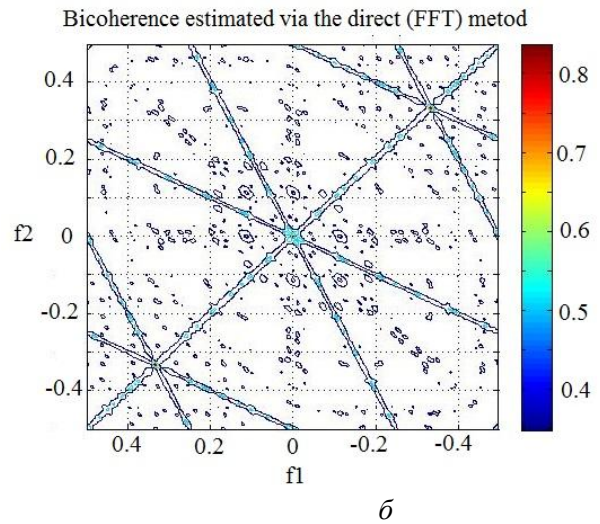
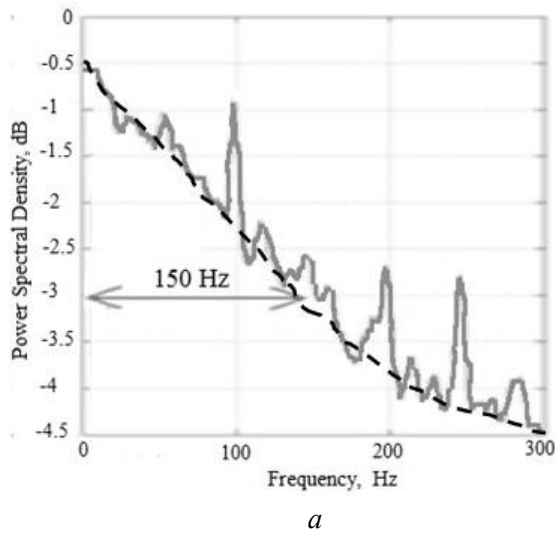


Рис. 4. Спектральная плотность мощности эхо-сигнала, отраженного от облаков Sc (а) и оценка бикогерентности (б) на дальности 3750 м

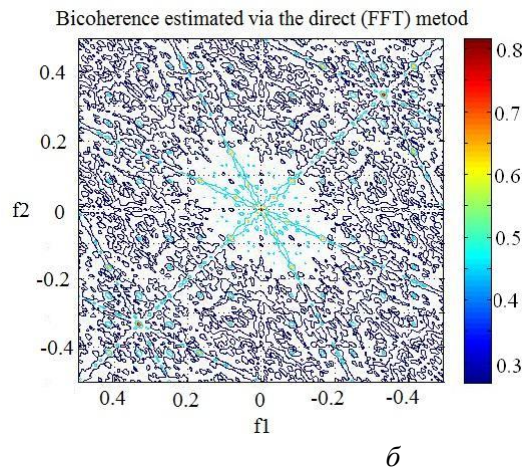
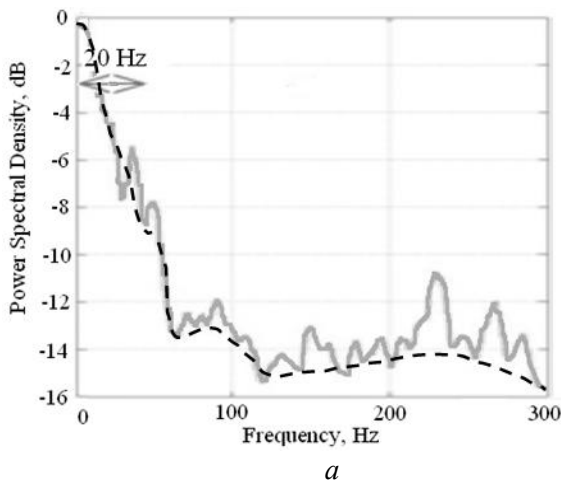


Рис. 5. Спектральная плотность мощности эхо-сигнала, отраженного от облаков Cu (а) и оценка бикогерентности (б) на дальности 5100 м

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 2, позволяет отметить следующее. Для случая слоисто-кучевых облаков процент значений бикогерентности, превышающих пороги 0,7 и 0,5, составляет 0,02 и 0,76 % соответственно.

Таблица 2

Тип облачности	Наклонная дальность, м	Показатель превышения порога		Высота, м
		Порог 0,7	Порог 0,5	
Sc (op.и trans)	3750	0,02%	0,76%	651
Cu	5100	16,19%	95,0%	885
	3300	18,4%	96,7%	572
	1500	0,6%	3,7%	260
Ns	3150	0,77%	11,21%	546

Для второго случая исследования кучево-дождевых облаков процент значений бикогерентности, превышающих пороги 0,7 и 0,5, составляет 16,19 и 95 % соответственно.

Как видно из приведенных результатов в слоисто-кучевых облаках на дальности 3750 м преобладают турбулентные потоки, а в кучево-дождевых облаках на расстоянии 5100 м преобладают ламинарные воздушные потоки. Полученные результаты соответствуют данным работы [1] по различению турбулентных и ламинарных метеообразований на основе оценки ширины спектральной плотности мощности отраженных от метеообразований сигналов

На рис. 6 – 8 соответственно представлены результаты расчетов спектральной плотности мощности и оценки бикогерентности для кучево-дождевых ( $Cu$ , наклонная дальность равна 3300 и 1500 м) и слоисто-дождевых облаков ( $Ns$ , наклонная дальность равна 3150 м).

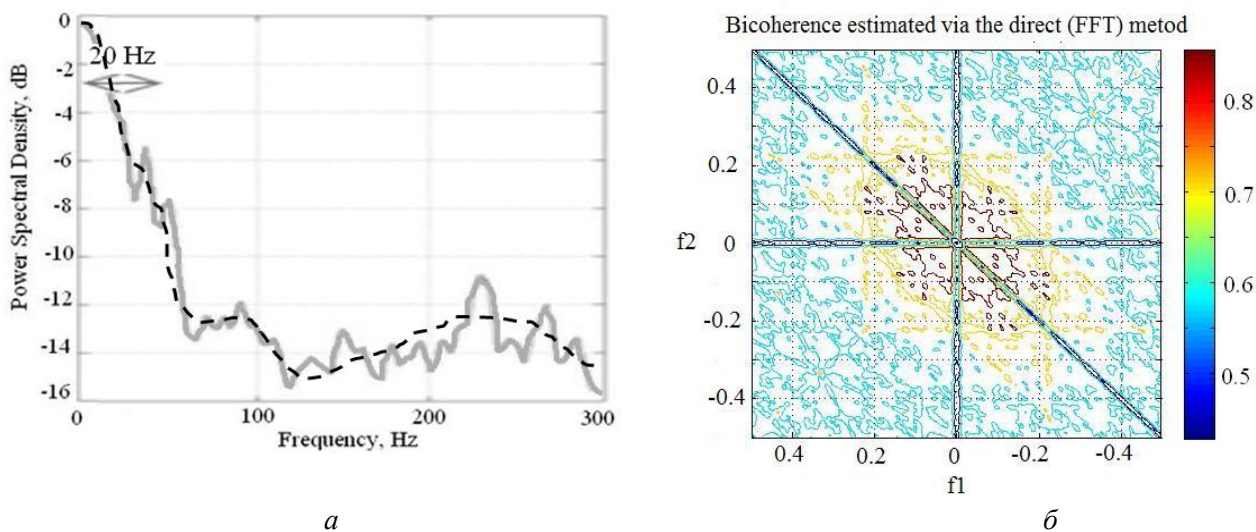


Рис. 6. Спектральная плотность мощности эхо-сигнала, отраженного от облака  $Cu$  (a) и оценка бикогерентности (б) на дальности 3300 м

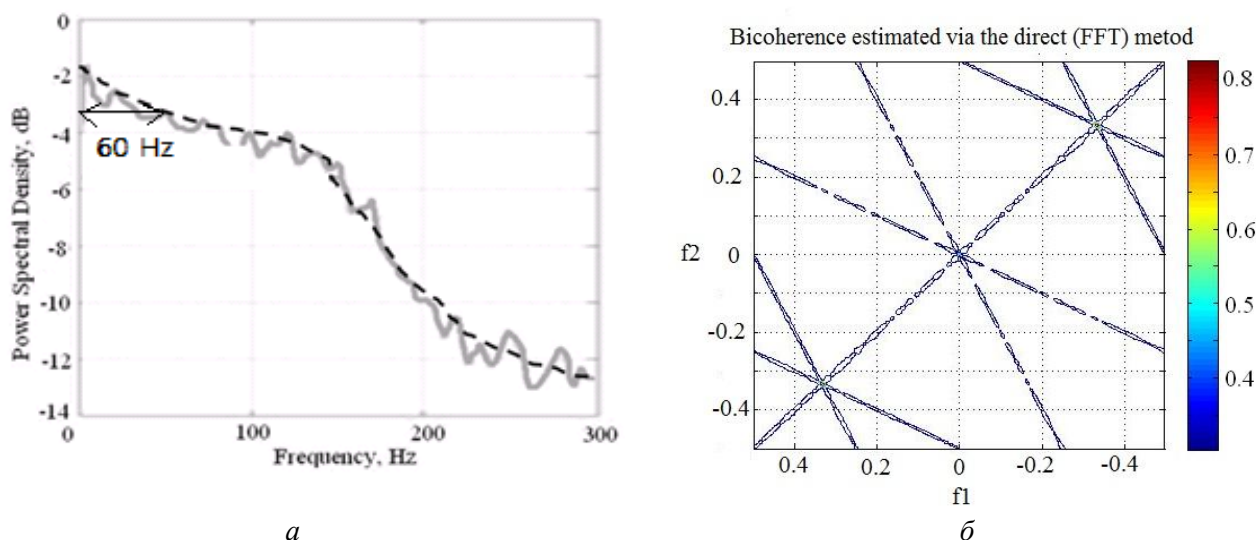


Рис. 7. Спектральная плотность мощности эхо-сигнала, отраженного от облака  $Cu$  (a) и оценка бикогерентности (б) на дальности 1500 м

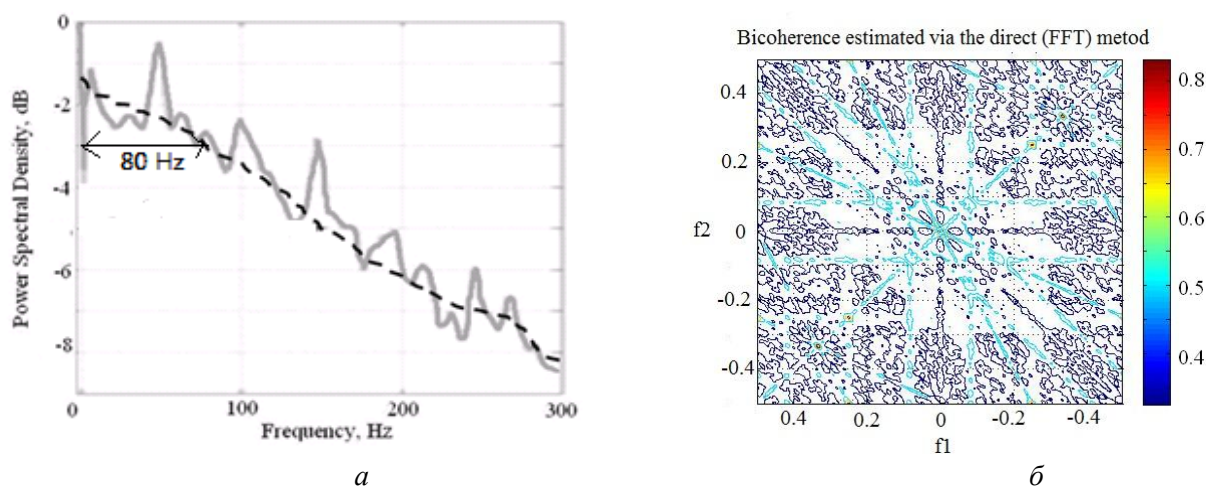


Рис. 8. Спектральная плотность мощности эхо-сигнала, отраженного от облака Ns (а) и оценка бикогерентности (б) на дальности 3150 м

### Заклучение

1. Предложен новый метод обнаружения и различения турбулентных и ламинарных метеообразований на основе оценивания нового информативного признака – оценки бикогерентности радиолокационного эхо-сигнала в системах метеолокации.
2. Представлены результаты экспериментальных исследований, полученные с помощью некогерентного МРЛ, работающего в сантиметровом диапазоне длин волн.
3. Выполнены статистические расчеты оценок спектральной плотности мощности и бикогерентности, полученные в результате радиофизических измерений обратного рассеяния на различных типах облаков.
4. Обработка результатов экспериментальных исследований показывает, что принятие решения в пользу ламинарных или турбулентных атмосферных образований при использования критерия принятия решения в виде ширины полосы спектральной плотности мощности сопровождается неоднозначностью. В то же время, в предлагаемом подходе, где использована оценка бикогерентности, данная неоднозначность устранена.

**Список литературы:** 1. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден / Ф.Й. Яновський. – Київ : Вид-во НАУ, 2003. – 304 с. 2. Doviak R.J. and Zrnice D.S. Doppler Radar and Weather Observations / R.J. Doviak and D.S. Zrnice. – 2nd edition, San Diego, CA, Academic Press, 1993. – 562 p. 3. Bringi V.N. and Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications / V.N. Bringi and V. Chandrasekar. – Cambridge University Press UK, 2004. – 636 p. 4. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облаков и осадков / Г.Б. Брылев, С.Б. Гашина, Г.Л. Низдойминога. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 231 с. 5. Nikias C.L., Raghuveer M.R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework / C.L. Nikias, M.R. Raghuveer // Proc. IEEE, Vol. 75, No. 7, 1987, P. 869-891. 6. Зеленский А.А. Биспектральный анализ в приложении к цифровой обработке сигналов / А.А. Зеленский, В.В. Лукин, А.В. Тоцкий. – Гл. 2 // Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях ; под ред. В.Ф. Кравченко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 92-173. 7. Totsky A.V. Bispectral methods of signal processing. Application in radar, telecommunications and digital image restoration / A.V. Totsky, A.A. Zelensky, V.F. Kravchenko. – Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Munich/Boston, 2015. – 203 p. 8. Fackrell J. Bispectral analysis of speech signals / J. Fackrell. – PhD Thesis, The University of Edinburgh, 1996. – 216 p. 9. Белов Е.Н. Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеообразований / Е.Н. Белов, О.А. Войтович, Т.А. Макулина, Г.А. Руднев, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 57-63. 10. Белов Е.Н. 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 // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 408-413. 11. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова ; [Д. П. Беспалов и др. ; ред. Л. К. Сурыгина]. – С.-Пб. : Д'АРТ, 2011. – 248 с.

Национальный аэрокосмический университет  
имени Н.Е. Жуковского  
Институт радиофизики и электроники  
имени А.Я. Усикова НАН Украины

Поступила в редколлегию 21.02.2016