

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ В МОДЕРНИЗИРОВАННОМ МЕТЕОРАДИОЛОКАТОРЕ МРЛ-5

Ефремов В.С.¹, Велегжанин И.С.¹, Вовшин Б.М.², Лаврукевич В.В.², Леховицкий Д.И.³

¹ОАО “НПО “Лианозовский электромеханический завод”

Дмитровское шоссе 110, 127411, Москва, Российская Федерация.

Тел. (+7-495)-485-51-33; E-mail: ISV1980@yandex.ru ;

²ООО “Центр научно-технических исследований “ЭЛЕРОН”

Просп. Зеленый 6/2, 111141, Москва, Российская Федерация.

Тел./Факс (+7-495) 368-30-40, E-mail: nti@eleron.net; vladimir@eleron.net ;

³Харьковский Национальный университет радиоэлектроники

Просп. Ленина. 14, 61166, Харьков, Украина.

Тел. (+38 057) 702-17-35; 702-11-38, E-mail: akad@kture.kharkov.ua;

Results of experimental investigations into Doppler meteorological radars with new methods of spectral analysis are considered.

Введение. До настоящего времени в странах СНГ наиболее распространены импульсные метеорадиолокаторы семейства МРЛ-(1-5), разработанные и изготовленные в СССР. Эти некогерентные МРЛ извлекают только амплитудную информацию о метеорообразованиях (МО), облучаемых простыми (МОНО) сигналами с высокой импульсной мощностью. Вместе с тем службам метеопрогноза требуется информация и о средней радиальной скорости и турбулентности МО в заданных элементах разрешения анализируемой зоны пространства, содержащаяся, в частности, в средней доплеровской частоте и ширине спектра междупериодных флуктуаций МО. Для определения этих параметров МО требуются доплеровские МРЛ (ДМРЛ) с когерентным передатчиком и квадратурной обработкой на прием.

В связи с этим в процессе разработки первого в СНГ доплеровского МРЛ для проверки основных принципов его построения в канал S диапазона МРЛ-5 была встроена когерентная приемно-передающая аппаратура РЛС «Лира-А10». Для определения параметров междупериодных флуктуаций МО наряду с традиционным для МРЛ спектральным анализом (СА) на основе классического дискретного преобразования Фурье (ДПФ) впервые использовались специальные версии [1] т. н. “сверхразрешающих” методов СА [1–4]. Важной задачей эксперимента была также проверка возможности работы МРЛ со сложным (нелинейно частотно-модулированным (НЧМ) сигналом), позволяющим существенно (примерно в базу раз) снизить пиковую импульсную мощность передатчика по сравнению со штатным режимом при сохранении дальности обнаружения МО и разрешающей способности МРЛ по дальности.

1. Условия и методика эксперимента. Схема эксперимента на МРЛ-5 ГГО им. Воейкова (г. Санкт-Петербург) показана на рис. 1.

Технические параметры встроеной аппаратуры «Лира-А10»:

- генерируемая импульсная мощность - $P_{\text{и}} \leq 7$ кВт;
- чувствительность приемного устройства в полосе $\Delta f_{\text{с}} \approx 0.5$ МГц - (-142 дБ/Вт);
- длительность НЧМ сигнала - $\tau_{\text{и}} = 64$ мкс;
- девиация частоты НЧМ сигнала - $\Delta f_{\text{с}} \approx 500$ кГц;
- база НЧМ сигнала ≈ 32
- уровень максимального бокового лепестка сжатого НЧМ сигнала $R \leq -50$ дБ.

Рекордно низкий уровень боковых лепестков при относительно малой базе сигнала достигнут за счет специального закона внутриимпульсной модуляции частоты зондирующих НЧМ импульсов.

Для проверки степени эквивалентности междупериодных амплитудных и фазовых характеристик МО при использовании МОНО и сложных НЧМ сигналов (со сверхнизким уровнем боковых лепестков) частота повторения $M = 12$ - импульсных пачек сигналов каждого вида была выбрана более низкой, чем требуется для однозначного определения

дальности. Для расширения интервала однозначного определения скорости МО до ± 25 м/с использовалась попарная вобуляция интервалов T_i ($i=1,2,3,4$) зондирования в 4-х подпачках из трех импульсов каждая.

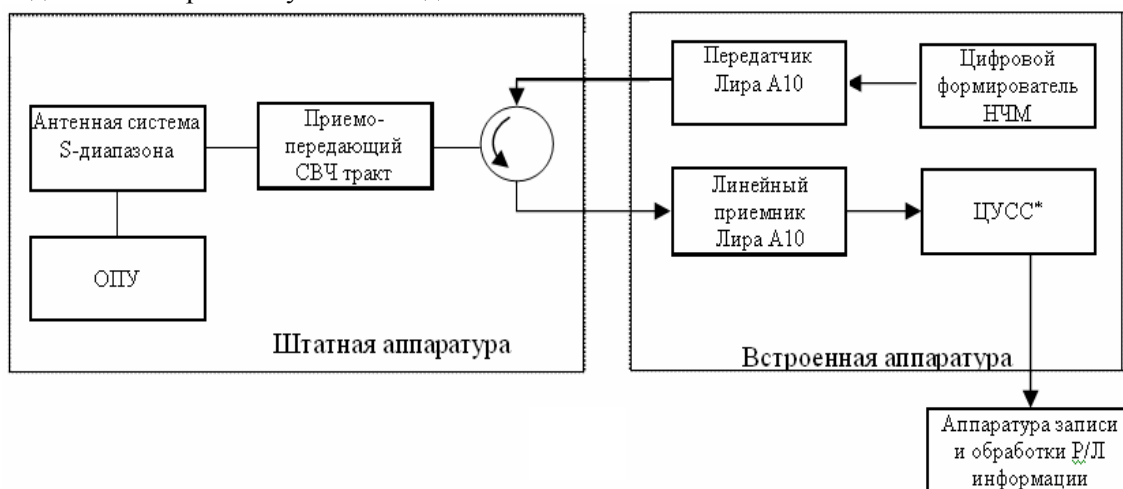


Рис. 1

Спектральные характеристики МО определялись путем обработки различными методами СА цифровых записей квадратурных составляющих отсчетов МОНО и НЧМ сигналов с выхода цифрового устройства сжатия НЧМ сигнала (ЦУСС).

В ходе эксперимента сравнивались три метода СА, отличающиеся своими спектральными функциями (СФ) $S(v)$ – зависимостями значений спектральной плотности мощности междупериодных флуктуаций МО от радиальной скорости V перемещения отражателей:

1.
$$S(v) = S_F(v) = \mathbf{x}^*(v) \cdot \hat{\Phi} \cdot \mathbf{x}(v) / M ;$$
2.
$$S(v) = S_2(v) = M / \mathbf{p}^*(v) \cdot \mathbf{p}(v), \quad \mathbf{p}(v) = \{p_i(v)\}_{i=1}^M = \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{x}(v);$$
3.
$$S(v) = S_3(v) = 1 / |p_M(v)|^2 ;$$

Здесь $\hat{\Phi} = (1/K) \cdot \sum_{i=1}^K \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^*$ – максимально правдоподобная (МП) оценка $M \times M$ корреляционной матрицы (КМ) междупериодных флуктуаций МО, сформированная по K – мерной выборке $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^K$ взаимно независимых M – мерных пачек $\mathbf{y}_i = \{y_\ell^{(i)}\}_{\ell=1}^M$ отражений M интервалов зондирования из K элементов разрешения по дальности [2], $\mathbf{x}(v) = \{\exp(j4 \cdot \pi \cdot v \cdot T_\ell / \lambda)\}_{\ell=1}^M$ – M -мерный вектор сканирования по радиальной скорости V , образованный отсчетами комплексной гармоники частотой $f_d = 2 \cdot v / \lambda$ в моменты T_ℓ излучения ℓ – го импульса пачки относительно первого, λ – длина волны РЛС, \mathbf{H}_m – МП оценка нижней треугольной ленточной (с шириной ленты m) матричной импульсной характеристики (МИХ) квазиобеляющего фильтра МО [1, 2].

Первая СФ соответствует общеупотребительному в ДМРЛ методу ДПФ, вторая и третья – методам минимальной дисперсии (МД) Кейпона и максимальной энтропии (МЭ) Берга, модернизированным за счет ленточности МИХ [1-4].

Для всех СФ определялась координата v_{\max} глобального максимума (перебором с шагом $\Delta v = 0,25$ м/с), отождествлявшаяся со значением средней радиальной скорости МО,

и их ширина на уровне 0.5 от максимума, характеризующая степень турбулентности МО в соответствующем элементе разрешения.

2. Результаты экспериментов. На рис. 2 показаны примеры нормированных экспериментальных СФ подстилающей поверхности (в дБ), полученные каждым из методов. Видно, что положения максимумов СФ в этом случае, как и должно быть из физических соображений, близки к нулю и практически совпадают для всех методов. Однако ширина СФ методов МД Кейпона и МЭ Берга (0,25 м/с) существенно меньше полученной методом ДПФ (1,25 м/с). Эти закономерности в равной степени проявляются для НЧМ и МОНО сигналов. Тем самым эксперимент полностью подтвердил справедливость изложенной в [1] теории, в которой этот результат был предсказан и объяснен. Экспериментально подтвержден и вывод [1] о том, что число импульсов в пачке, требующихся для заданной точности измерения ширины спектра, для метода ДПФ больше, чем для методов МД и МЭ. В показанных на рис. 3 нормированных экспериментальных СФ подстилающей поверхности, соответствующих НЧМ зондирующим сигналам, примерно равная ширина по уровню $-(5 - 15)$ дБ от максимума методами МД и МЭ обеспечена пачкой размера $M=12$, тогда как для метода ДПФ в этом случае потребовалась пачка размера $M=24$. Это преимущество «сверхразрешающих» методов СА имеет важное практическое значение для метеолокаторов, в которых из-за высоких требований к темпу выдачи информации возможность использовать пачки больших размеров крайне ограничена. Еще одно преимущество «сверхразрешающих» методов СА связано со значительно меньшим уровнем «дифракционных» максимумов СФ, порожденных использованным законом зондирования.

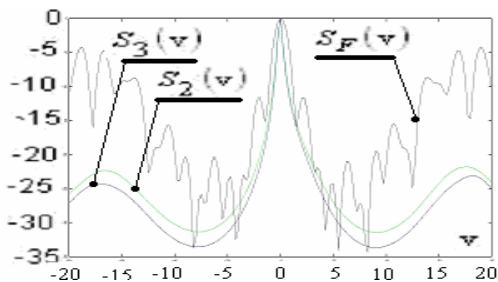


Рис. 2

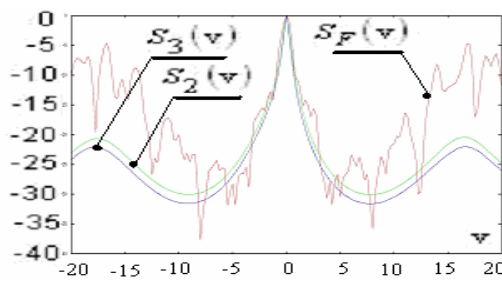


Рис. 3

Для малоскоростных облаков ($v_r=3-4$ м/с) спектры отражений, полученные по НЧМ и МОНО сигналам (рис. 4), близки форме и параметрам. Полученные в эксперименте отличия в ширинах спектров объясняются более высоким отношением сигнал/шум (ОСШ) для НЧМ сигнала (~ 27 дБ) по сравнению с МОНО сигналом (~ 12 дБ).

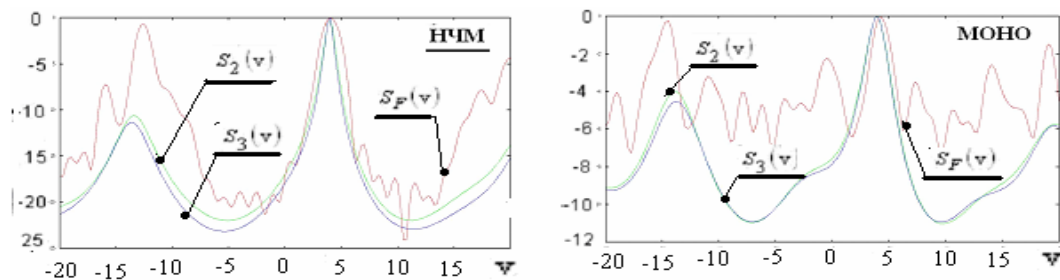


Рис. 4

Аналогичный результат получен для облаков, движущихся со средней радиальной скоростью $v_r=6-8$ м/с. При таких скоростях может возрастать уровень «дифракционных» максимумов СФ (лепестков неоднозначности) для методов Кейпона и Берга по сравнению со случаем $v_r=0$, которые, однако, остаются существенно более низкими, чем у метода ДПФ. Для последнего они определяются средней частотой зондирования и практиче-

ски не зависят от значения v_T . Отличия спектров для МОНО и НЧМ сигналов несущественны и для больших скоростей облаков $v_T=10-11$ м/с и связаны только с различиями ОСШ в анализируемом элементе дистанции.

Еще один пример спектров движущихся МО при НЧМ зондирующем сигнале показан на рис. 5. В этом примере спектр ДПФ оказался двухмодовым с разным уровнем мод, что затрудняет оценку средней скорости МО.

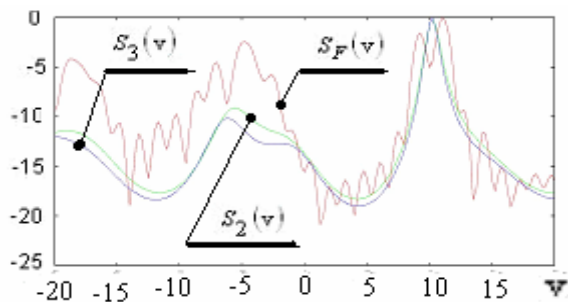


Рис. 5

Многомодовость спектра сопровождается и его расширением, в связи с чем усложняется измерение не только средней скорости МО, но и степени их турбулентности. Через 7–8 отсчетов центральная частота спектра ДПФ начинает приближаться к центральной частоте спектров Кейпона и Берга. Это свидетельствует об инерционности спектра Фурье при быстром изменении средней скорости. Такое поведение спектра Фурье также было теоретически предсказано в [1], где исследовались ошибки измерения

неравномерных («небелых») спектров, вызванные, например, присутствием в пределах одного элемента разрешения различных процессов (шум-облако и т.п.) или ненулевым градиентом радиальной скорости ветра в нем.

Заключение. Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

- основные параметры спектров метеообразований, полученные при использовании МОНО и НЧМ зондирующих сигналов, имеют высокую степень сходства, что свидетельствует о возможности и целесообразности практически использовать последние в существующих и разрабатываемых метеорадиолокаторах;

- предсказанные теорией преимущества «сверхразрешающих» методов спектрального анализа по сравнению с традиционным для метеолокации методом ДПФ подтверждены экспериментально;

- современная цифровая элементная база позволяет на практике реализовать различные «сверхразрешающие» методы спектрального анализа, в частности, использованные в эксперименте модификации методов МД Кейпона и МЭ Берга, на унифицированной структурно-алгоритмической основе адаптивных решетчатых фильтров. В этом случае возможны и другие методы извлечения метеоинформации, не связанные с вычислением спектральных функций и одновременно позволяющие расширить информативность отражений от МО [1]. Их изучение перспективно для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Литература

1. Леховицкий Д. И., Жуга Г. А., Вовшин Б. М., Лаврукевич В. В. Извлечение метеоинформации на основе спектрального и корреляционного анализа отражений в импульсных доплеровских метеорологических РЛС. – Х.: Прикладная радиоэлектроника, Т.4, 2007, №4.

2. Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко, Д. И. Леховицкий, С. П. Лещенко, Ю. И. Лосев, А. И. Николаев, С. А. Горшков, С. В. Москвитин, В. М. Орленко. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007.- 512 с илл.

3. Capon J. High Resolution Frequency – Wave number Spectrum Analysis. Proc. IEEE, 1969, 57, pp. 1408-1418.

4. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.

5. Леховицкий Д. И. СДЦ в импульсных РЛС: Почти без формул, но с картинками. 1. Оптимальная между периодической обработкой гауссовых сигналов на фоне гауссовых пасивных помех. – Х.: Прикладная радиоэлектроника, т.5, 2006, №2, с. 192-200.