

Д. М. Пиза, Н. П. Чернобородова, М. П. Чернобородов

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТЕОКАНАЛА АЭРОДРОМНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА «ДНЕПР-А»

Проведен анализ технических решений, использованных при проектировании аэродромного радиолокационного комплекса (АРЛК) «Днепр-А», и алгоритмов обработки метеоданных, источником которых является канал цели. Оценена эффективность работы метеоканала опытного образца локатора. Предложены пути дальнейшего усовершенствования метеоканала комплекса «Днепр-А», апробированы новые алгоритмы устранения влияния мешающих отражений от земной поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное увеличение количества авиационных полетов вызывает необходимость постоянного совершенствования существующих систем управления воздушным движением (УВД). Перспектива внедрения в Европейском воздушном пространстве новой концепции кооперативного УВД (Cooperative ATM) и режима «Свободного полета» (Free flight) выдвигают более жесткие требования к средствам поддержки необходимого уровня безопасности воздушного движения. Одной из составляющих усовершенствования средств поддержки является повышение качества метеоинформации, используемой для прогнозирования погоды, оперативного предупреждения о надвигающихся опасных явлениях природы (ураганы, шквалы и др.).

Создание специализированных доплеровских метеорологических РЛС [1] определенным образом повысило качество метеорологической информации за счет извлечения из отраженных сигналов сведений о радиальной составляющей скорости метеобъектов. Однако, усовершенствование метеорологических РЛС не решило проблему оперативности поступления метеоинформации для управления воздушным движением. Альтернативой применению метеорологических РЛС является использование метеоканала в структуре аэродромных и трассовых РЛС УВД. Особенно актуально наличие встроенного метеоканала для стран, в которых отсутствует развитая сеть метеостанций. В США, например, развертываемой национальной сетью метеолокаторов нового поколения NEXRAD запланировано охватить не все аэропорты страны. В таких местах по-прежнему продолжают эксплуатировать РЛС УВД со встроенным метеоканалом – диспетчерский радар ASR-9 [2].

© Пиза Д. М., Чернобородова Н. П., Чернобородов М. П., 2007

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В НПК «Искра» (г. Запорожье) впервые в Украине разработан когерентно-доплеровский аэродромный радиолокационный комплекс (АРЛК) «Днепр-А» – аналог ASR-9 [3] производства США. Поэтому представляет интерес провести анализ использованных технических решений, оценить их эффективность и предложить пути дальнейшего усовершенствования метеоканала АРЛК «Днепр-А».

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В АРЛК «Днепр-А» используется вращающаяся зеркальная антенна с косеканс-квадратной диаграммой направленности. В качестве зондирующих сигналов станцией излучаются одиночные импульсы (для обзора «мертвой» зоны) и фазоманипулированные 13-позиционным кодом Баркера импульсы мощностью 130 кВт, обеспечивающие дальность действия в 170 км. Прием отраженных сигналов на длине волны в 10 см ведется по двум разнесенным на $2,5^\circ$ по углу места лучам. Ширины диаграмм направленности лучей в азимутальной плоскости – $2,5^\circ$.

В качестве входной информации для метеоканала станции используются модули спектральных составляющих доплеровских фильтров. В ближней зоне действия АРЛК с целью уменьшения влияний отражений от местных предметов обрабатывается радиолокационная информация, полученная из верхнего луча приемной антенны, а в дальней – информация нижнего луча. Оператор с рабочего места может изменять дальность, на которой необходимо переключать рассчитанную в лучах метеоинформацию для ее отображения.

Метеоканал «Днепр-А» выполнен на одном сигнальном процессоре ADSP-21160, одновременно обрабатывающем данные обоих приемных каналов станции. Результат работы метеоканала выводится на экране рабочего места оператора АРЛК в виде метеокарты. Метеоинформация может отображаться одновременно с информацией об обнаруженных воздушных судах. Размеры элементов метеокарты: $2,4 \text{ км} \times 5^\circ$ в ближней зоне (до $23,4 \text{ км}$ – может задаваться оператором АРЛК) и $2,4 \text{ км} \times 2,5^\circ$ в дальней. Для каждого элемента метео-

карты рассчитывается амплитуда отраженного от метеоявления сигнала. Эта амплитуда пропорциональна радиолокационной отражаемости метеообразования Z и позволяет провести обнаружение и классификацию метеообъектов, а также оценить интенсивность осадков. Рассчитанная амплитуда усредняется в «скользящем окне» за 3 оборота антенны, сравнивается с заранее рассчитанными значениями амплитуд сигналов от дождей различной интенсивности и каждому элементу метеокарты присваивается группа в соответствии с интенсивностью осадков. Проградуированная таким образом метеокарта отображается на индикаторе. Градации отличаются цветом.

Для вычисления амплитуды сигналов A_m , отраженных от метеоявлений, в отсутствие отражения от земной поверхности (преимущественно, в дальней зоне) модули амплитуд с выходов фильтров дискретного преобразования Фурье (ДПФ) суммируются по правилу сложения мощностей [1]:

$$A_m = \sqrt{A_0^2 + A_1^2 + \dots + A_{N-1}^2}, \quad (1)$$

где $A_0 \dots A_{N-1}$ – амплитуды сигналов с выходов фильтров преобразования Фурье, N – количество фильтров.

Поскольку источником обрабатываемых данных является канал цели, то, для уменьшения влияния мешающих отражений от земной поверхности, применяемые алгоритмы обнаружения метеоявлений основаны на отличиях спектральных характеристик последних. Эти отличия достигнуты благодаря высокой стабильности передатчика, применению весового окна при вычислении преобразования Фурье с малыми уровнями боковых лепестков, а также уменьшению межфильтрового «просачивания» (последнее обеспечивается формированием нулей АЧХ, расположенных на центральных частотах главных лепестков остальных фильтров). Для понимания сути реализованных в метеоканале АРЛК «Днепр-А» алгоритмов обработки рассмотрим примеры радиолокационных спектров.

На рис. 1, а представлены амплитуды модулей спектральных составляющих отраженных сигналов от местных предметов, находящихся на расстоянии 4,5...5,1 км от АРЛК, нескольких подряд излученных частотных пачек в азимутальном секторе 165°19'...167°49'. Нумерация фильтров в пределах каждой частотной пачки – слева направо. Из анализа рис. 1, а следует, что:

- спектральные составляющие местных предметов сосредоточены в 0, 1 и $N - 1$ фильтрах с равноамплитудными значениями в первом и $N - 1$ фильтрах;
- уровень амплитуд в остальных фильтрах (2, ..., $N - 2$) не зависит от наличия неподвижных местных предметов.

На рис. 1, б представлены модули амплитуд спектральных составляющих отраженных сигналов от дождя средней интенсивности. Спектр отраженных сигналов сосредоточен в трех-четырех фильтрах с одним-двумя локальными максимумами, причем амплитуды сигналов в них отличаются незначительно. Это дает возможность различать их и сигналы от местных предметов.

Если в одном элементе разрешения по дальности одновременно присутствуют отклики от местного предмета и метеообразования, и их спектры перекрываются, то симметрия сигналов в первом и $N - 1$ фильтрах нарушается. На рис. 1, в представлены амплитуды сигналов на выходах фильтров ДПФ, отраженных от местного предмета и метеоявления, где видно нарушение симметрии спектральных составляющих в первом и $N - 1$ доплеровских фильтрах.

Для устранения влияния отражений от земной поверхности на рассчитываемую метеоканалом величину A_m , в ближней зоне АРЛК реализуется довольно громоздкий алгоритм уменьшения влияния этих отражений (в дальней зоне предполагается их полное отсутствие) путем сглаживания на интервале дальности 2,4 км (по размеру элемента метеокарты) амплитуд одноименных фильтров с учетом асимметрии в первом и $N - 1$ фильтрах. Основу операции сглаживания составляет усреднение амплитуд с отбрасыванием нескольких

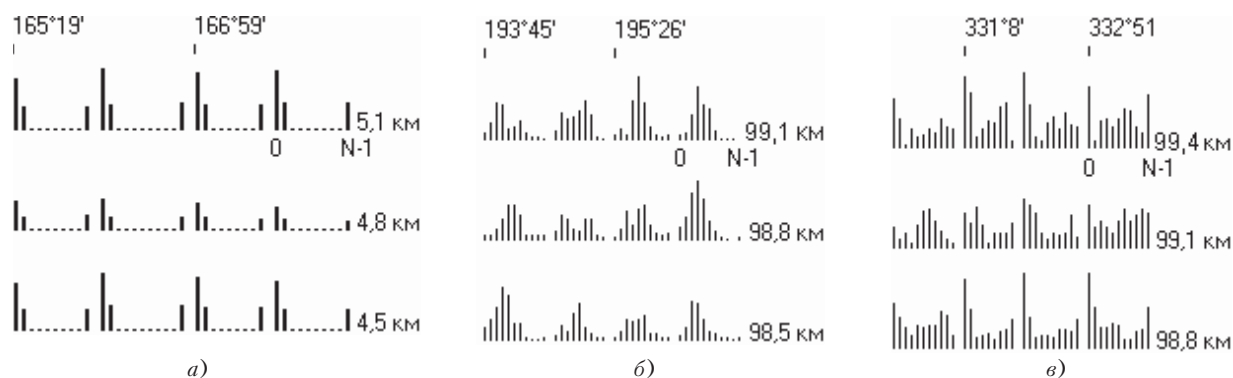


Рисунок 1 – Модули спектральных составляющих местного предмета (а), дождя средней интенсивности (б), местного предмета и облака (в)

максимальных и минимальных значений по информации нескольких частотных пачек. В дальней зоне величина A_m определяется согласно (1) по этим усредненным значениям. В ближней зоне после усреднения выполняется поиск большего из локальных максимумов $A_{\max i}$. Если он не относится к нулевому фильтру, то в качестве A_m принимается найденное значение:

$$A_m = \max(A_{\max i}). \quad (2)$$

В противном случае, в отсутствие асимметрии, A_m вычисляется по информации первого и $N - 1$ фильтров:

$$A_m = f_1(A_1, A_{N-1}), \quad (3)$$

а при наличии асимметрии – нулевого и меньшего из первого и $N - 1$ фильтров:

$$A_m = f_2[A_0, \min(A_1, A_{N-1})], \quad (4)$$

где f_1 и f_2 – обозначение функциональной зависимости; A_0, A_1, A_{N-1} – амплитуды нулевого, первого и $N - 1$ фильтров, соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТЕОКАНАЛА И ПОВЫШЕНИЕ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Недостаточное качество представления метеоданных наряду с выявленными (в ходе наладки опытного образца радиолокатора в г. Запорожье) низкой вероятностью правильного обнаружения метеоявлений и высокой вероятностью их ложных обнаружений вызвало необходимость проведения дальнейших исследований.

Для оценки результата работы метеоканала, на рис. 2 приведен внешний вид экрана оператора АРЛК «Днепр-А» в режиме отображения только метеоинформации. Показанная на рис. 2 большая изрезанность внешних контуров, отсутствие внутренних элементов изображения облаков, а также большое количество разрозненных метеоячеек различных уровней интенсивности обусловлено, во-первых, большими размерами элемента разрешения метеокарты. Это значительно затрудняет возможности своевременного обнаружения процесса зарождения стремительно развивающихся кучево-дождевых облаков (Сб), наиболее опасных для полетов воздушных транспортных средств. Поэтому, предложено уменьшить размеры элемента метеокарты до $600 \text{ м} \times 1^\circ$ (согласно размерам кучевых облаков Сс [4]).

Во-вторых, это обусловлено также и неверным предположением об отсутствии мешающих отражений от земной поверхности в дальней зоне: на рис. 1, в продемонстрировано присутствие таковых на дальностях 98,8...99,4 км, что вчетверо превышает границу ближ-



Рисунок 2 – Внешний вид экрана оператора АРЛК «Днепр-А» в режиме отображения только метеоинформации

ней зоны в 23,4 км (даже в условиях равнинной местности). Кроме того, при одном и том же местоположении РЛС может иметь место существенная изрезанность ландшафта местности как по дальностной, так и по азимутальной координатам. Вследствие этого предложено отказаться от разделения обрабатываемой дальности на ближнюю и дальнюю зоны и пересмотреть алгоритмы устранения влияния отражений от земной поверхности.

В-третьих, это обусловлено характером примененных алгоритмов расчета величины A_m . Поскольку метеообразования имеют широкий спектр [1], то оценка A_m по значению амплитуд одного-двух доплеровских фильтров (согласно (2)–(4)) будет существенно меньшей, чем согласно (1). Как показано на рис. 1, б, в, основная часть спектра отраженных сигналов от метеоявлений сосредоточена как минимум в трех-четырех фильтрах. Следовательно, для повышения точности расчета величины A_m необходимо обрабатывать возможно большее число фильтров.

Частое чередование ячеек карты с разными уровнями градаций (см. рис. 2) и существенные изменения отображаемой метеоинформации от оборота к обороту происходило из-за неправильного выделения метеообразований на фоне отражений от земной поверхности. Поэтому, если в спектре принятого сигнала присутствуют отражения от местного предмета, то при наличии максимума в нулевом фильтре и равноамплитудных значениях в первом и $N - 1$ фильтрах величину A_m предложено рассчитывать согласно (1), но без учета амплитуд упомянутых фильтров по формуле:

$$A_m = \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_{N-2}^2}. \quad (5)$$

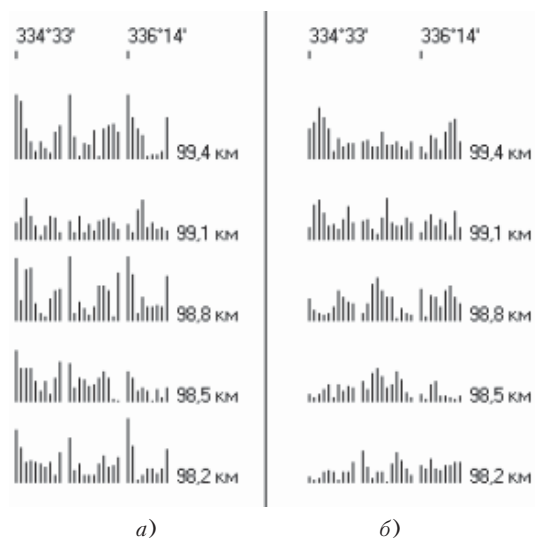


Рисунок 3 – Спектр сигналов, отраженных от метеообразований, в нижнем луче (а) и верхнего луча (б) на фоне мешающих отражений от земной поверхности



Рисунок 4 – Результат работы усовершенствованного алгоритма обработки и отображения метеоинформации

Если в одном элементе разрешения по дальности одновременно присутствуют отклики от местного предмета и метеообразования, и их спектры перекрываются, то симметрия сигналов в первом и $N - 1$ фильтрах нарушается. В этом случае амплитуду сигнала от метеобъекта предложено рассчитывать по формуле, в которой исключена амплитуда сигнала нулевого фильтра и учтена разность амплитуд первого и $N - 1$ фильтров (эта разность несет соответствующую часть информации о метеообразовании):

$$A_m = \sqrt{|A_1^2 - A_{N-1}^2| + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_{N-2}^2}. \quad (6)$$

Дополнительные возможности классификации метеобъектов получены путем перехода к межканальной обработке, основанной на различиях в спектральных портретах одного и того же участка пространства по высоте. Если в нижнем луче в одном элементе разрешения по дальности присутствуют отражения от метеообразования и мешающих отражений от земной поверхности, то в спектре отраженного сигнала от этого же элемента в верхнем луче такая помеха может отсутствовать. На рис. 3 продемонстрированы такие различия: спектра сигналов нижнего луча (см. рис. 3, а) – сформирован из отражений от земной поверхности и метеобъектов спектра сигналов верхнего луча (см. рис. 3, б) – наблюдаются отражения только от метеоявлений. Поэтому, в таких случаях для повышения точности выделения метеобъектов необходимо брать для оценки амплитуды метеообразований A_m информацию верхнего луча. Значительное превышение амплитуды метеосигнала в нижнем луче над верхним может

свидетельствовать о выпадении осадков или, например, наличии горизонтальных сдвигов ветра.

На рис. 4 приведен пример обработки исходных данных для рис. 2 с учетом предложенных усовершенствований метеоканала. Как показано на рис. 4, изменения в алгоритмах обработки метеоданных позволили получить не только качественное улучшение отображения метеобстановки, но и повысить вероятность правильного обнаружения метеоявлений (например, на рис. 2 отсутствуют облака в левой части рисунка).

ВЫВОДЫ

Проведен анализ технических решений, использованных при проектировании метеоканала аэродромного радиолокационного комплекса «Днепр-А», и алгоритмов обработки метеоданных, источником которых является канал цели. Оценена эффективность работы метеоканала опытного образца локатора. Предложены пути дальнейшего усовершенствования метеоканала комплекса «Днепр-А», апробированы новые алгоритмы устранения влияния мешающих отражений от земной поверхности.

Дальнейшие работы по совершенствованию метеоканала следует вести по таким направлениям:

- повышение точности оценки амплитуды метеосигнала с учетом ожидаемого коэффициента заполнения облучаемого импульсного объема метеобъектом;
- улучшение распознавания метеобъектов путем сравнения данных метеоканала, метеолокатора и метеостанции.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Довиак Р. Дж. Метеорологические доплеровские РАС / Р. Дж. Довиак, Д. С. Зрнич, Д. С. Сирманс // ТИИЭР. – М., 1979. – Т. 67, № 11. – С. 63–102.
2. Mark E. Weber Advances in Operational Weather Radar Technology // Lincoln Laboratory Journal. – Lexington, 2006. – Vol. 16, № 1. – P. 9–22.
3. Тейлор-мл. Дж. Новая диспетчерская радиолокационная станция ASR-9 / Дж. Тейлор-мл., Г. Бруннс // ТИИЭР. – М., 1985. – Т. 73, № 2. – С. 128–135.
4. Яновський Ф. Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден: Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2003. – 304 с.

Надійшла 16.11.07

Проведено аналіз технічних рішень, використаних при проектуванні аеродромного радіолокаційного комплексу (АРЛК) «Дніпро-А», і алгоритмів обробки метеоданих,

джерелом яких є канал цілі. Оцінено ефективність роботи метеоканалу дослідного зразка локатору. Запропоновано шляхи подальшого удосконалення метеоканалу комплексу «Дніпро-А», випробувані нові алгоритми зменшення впливу відбиттів від земної поверхні.

The analysis of technical solutions have been performed, when making a design of airfield radar complex (ARC) «Dnepr-A» weather channel, as well as of algorithms of processing weather data a source of which is target channel. There has been estimated efficiency of weather channel operation within the ARC development model. The ways of further enhancement of complex «Dnepr-A» weather channel were offered, new algorithms of eliminating an effect of underlying surface clutter have been approved.

УДК 681.51.012: 539.23

В. И. Псарев, Л. А. Пархоменко, Ю. В. Пьянкова

О ТЕХНИКЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ ТОНКИХ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК

Получены аналитические формулы для проведения системного анализа структурного огрубления островковых пленок на подложке. Для этой цели предложен метод установления сходства и различия между характеристиками теоретического и экспериментального распределения островков по размерам. Предложенный метод позволяет получать информацию о протекании процессов в системе микроостровков по мере их приближения к состоянию равновесия.

ВВЕДЕНИЕ

Применение тонких пленок в технике стало возможным после освоения методов их получения с заданными физико-химическими свойствами. Это открыло широкие возможности использования тонких пленок в оптике, космической и атомной промышленности и СВЧ-технике; в качестве элементов микросхем и тензодатчиков; в криогенной технике и других областях. Качество и надежность работоспособного состояния в процессе их функционирования в устройствах и приборах, в особенности, под влиянием внешних факторов, существенно зависят от структурной стабильности пленочного материала, достоверная информация о которой должна быть заранее получена методами системного физико-химического анализа. Рассмотрим в этой связи пленки островкового типа, подверженные огрублению из-за остwaldовской коагуляции микроостровков, осложненной рядом сопутствующих процессов. Их существенной характеристикой является функция плотности распределения островков по размерам.

© Псарев В. И., Пархоменко Л. А., Пьянкова Ю. В., 2007

Вызываемое внутрисистемными процессами огрубление островков изменяет характер их распределения по размерам, что оказывает существенное влияние на формирование микроструктурного состояния и свойства пленочного материала. Познание внутрисистемных процессов по признакам вызываемой ими трансформации экспериментальных распределений – задача, решение которой может быть распространено на широкий класс островковых пленок. Подразумевается возможность получения полезной информации путем выявления сходства и различия между экспериментальным распределением – образом и теоретической функцией распределения микроостровков по размерам – подобием, полученной с учетом определенных физических представлений.

Изучению кинетических особенностей огрубления островковых пленок на подложке посвящены многие работы [1–3]. Однако, в них не учитывалось, что огрубление микроостровков – процесс многофакторный: определяется влиянием структурного, диффузионного, межфазного и других факторов. При этом важное значение приобретает возможность установления характера влияния каждого из факторов в отдельности и в своей их совокупности на кинетические особенности изменения дисперсности микроостровков в процессе их огрубления.

В настоящей работе приведено описание предлагаемой методики системного анализа тонких островко-