

ПОДАВЛЕНИЕ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ В РЛС ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Радиолокационные станции вертикального зондирования атмосферы (РЛС ВЗ) [1] применяются для бесконтактного измерения профилей скорости ветра и уже давно являются штатным средством метеослужб. РЛС ВЗ повсеместно применяются для обеспечения авиации оперативными данными о параметрах поля ветра в атмосферном приграничном слое в районе взлетно-посадочной полосы. Рекомендации ИКАО по метеобеспечению авиации [1, 2] допускают погрешности оценивания скорости ветра не более 1 м/с и направления ветра 10°.

Для РЛС ВЗ, используемых для метеобеспечения авиации, существенным фактором, вызывающим промахи в измерениях, являются мешающие отражения от летательных аппаратов, регистрируемые по боковым лепесткам диаграммы направленности. Уровень рассеянного сигнала на входе приемного устройства РЛС ВЗ зависит от эффективной площади рассеяния (ЭПР) атмосферных турбулентных неоднородностей, которая связана со структурной функцией коэффициента преломления C_n^2 [1]. Высотная зависимость C_n^2 в тропосфере может быть аппроксимирована эмпирической формулой $C_n^2 = 10^{-(15.5+0.2h)}$ [1]. ЭПР атмосферных неоднородностей $\sigma_0 = \sigma_V \cdot V_u$, где эффективная площадь поперечного единичного объема

$\sigma_V = 0.38 C_n^2 / \sqrt[3]{\lambda}$, а импульсный объем $V_u = \frac{r^2 \pi^2 \lambda^2 \sigma_{\text{эф}}}{8 A_{\text{эф}}}$ [1.3]. При этом отношение сигнала/шум на верхней границе высотного диапазона РЛС значительно меньше единицы.

Отражательная способность летательных аппаратов (ЛА) характеризуется величиной ЭПР порядка десятков квадратных метров. При регистрации отражения от ЛА по главному лепестку ДН антенны РЛС ВЗ, превышение мощности мешающего отражения над мощностью рассеянного неоднородностями сигнала составляет около 100 дБ. Подавление мешающих отражений по боковым лепесткам антенн РЛС ВЗ не превосходит 50 дБ, так что отношение мощностей имеет порядок 50 дБ. Ввиду значительной частоты взлетов и посадок на современных аэродромах, частота регистрации мешающих отражений также значительна.

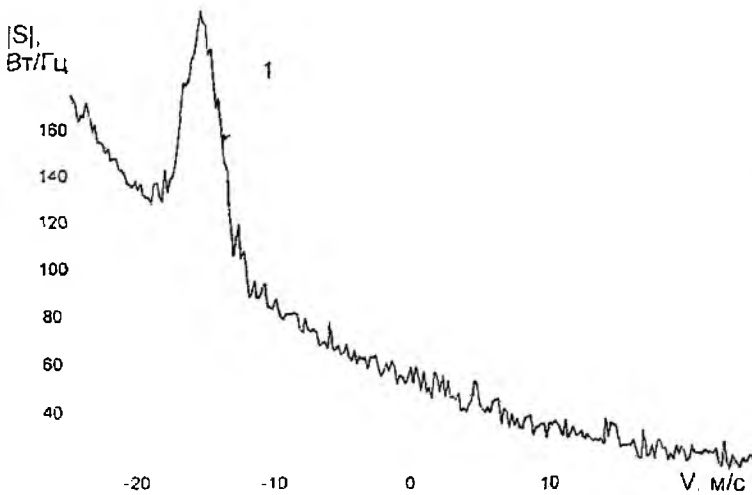


Рис. 1

Типичный вид выборочного спектра рассеянного сигнала РЛС ВЗ приведен в [1]. При пролете ЛА, отраженный от него сигнал вызывает характерные искажения спектра сигналов, регистрируемых РЛС ВЗ. Характер искажений зависит от текущего углового положения ЛА относительно антенны РЛС и от скорости движения ЛА. Один из примеров спектра рассеянного сигнала, искаженного воздействием отражения от ЛА, приведен на рис. 1. Экспоненциальный тренд спектра обусловлен выходом регистрируемой скорости ЛА за границы однозначно определяемых РЛС ВЗ скоростей.

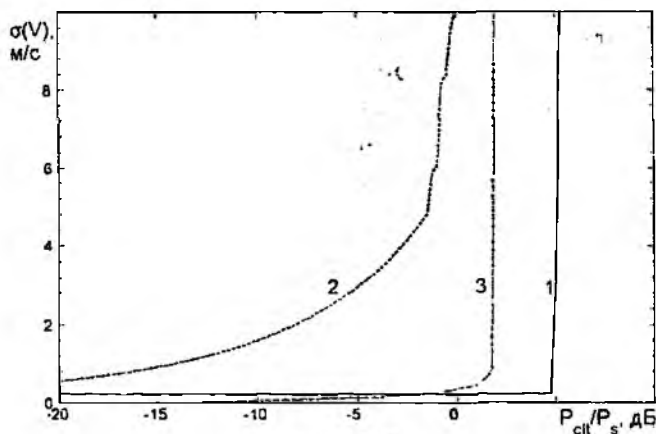


Рис. 2

На рис. 2 приведена зависимость среднеквадратического отклонения оценки скорости ветра от отношения мощностей «помеха/сигнал» для параметризации спектров методом максимумов (1), моментов (2) и наименьших квадратов (3). Анализ этой зависимости показывает, что для достижения уровня погрешностей, нормируемого рекомендацией ИКАО [2], мощность сигналов мешающих отражений должна быть одного порядка с мощностью рассеянного сигнала.

Для этого необходимо дополнительное подавление мешающих отражений более чем на 50 дБ. Одним из методов подавления мешающих отражений от ЛА, движущихся со скоростями большого диапазона однозначного определения скоростей РЛС ВЗ, является частотная селекция.

Повышение отношения сигнал/шум в процессе обработки радиолокационных сигналов в РЛС ВЗ происходит вследствие когерентного накопления рассеянных сигналов [4]. Процедура когерентного накопления состоит из низкочастотной фильтрации и прореживания [1, 4].

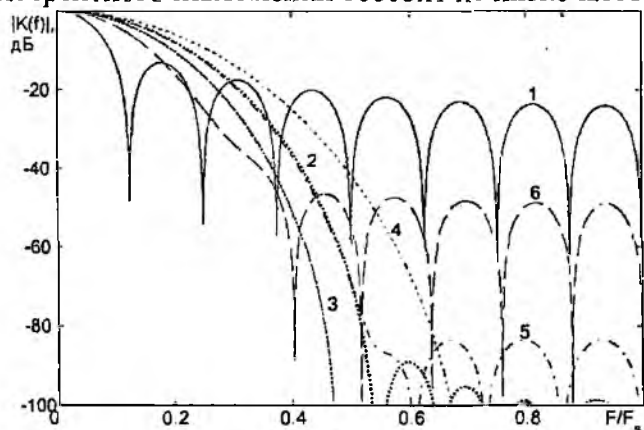


Рис. 3

На рис. 3 приведена АЧХ ФНЧ когерентного накопителя энергии сигнала для различных весовых функций (1 – нет взвешивания, 2 – весовая функция Блекмена – Харриса, 3 – Чебышева ($\beta=100$ дБ), 4 – Кайзера ($\beta=16$), 5 – Наттола, 6 – Гаусса ($\alpha=5$)). F_s – частота дискретизации.

АЧХ периодична с периодом $F_s/2N$ (F_s – частота дискретизации, N – кратность когерентного накопления), то есть помимо основной полосы пропускания, имеются дополнительные окна прозрачности.

Побочным эффектом снижения частоты дискретизации при когерентном накоплении энергии сигнала является перенос спектральных составляющих с частотами выше частоты дискретизации F_s , из дополнительных окон прозрачности исходной АЧХ [5] в область основной полосы частот. Это приводит к невозможности различать частотные составляющие с частотами f_0 и $f_0 + k \cdot F_s$, где $k = 1, 2, \dots, n$ (явление «подмены частот»).

В результате, операция частотной селекции мешающих отражений должна быть проведена до процесса децимации, где рассеянный сигнал и мешающие отражения от ЛА могут быть эффективно разделены фильтром. Поскольку низкочастотная фильтрация уже проводится при когерентном накоплении, целесообразно задействовать эту процедуру и для частотной селекции мешающих отражений. Подавление частотных составляющих в первом дополнительном окне прозрачности АЧХ составляет 13 дБ (рис. 3, кривая 1) для случая отсутствия взвешивания при когерентном накоплении. Этого подавления недостаточно для обеспечения требуемого уровня погрешностей параметризации спектров. Для повышения эффективности подавления мешающих отражений можно применить взвешенное когерентное накопление. Для этой цели могут использоваться временные весовые функции [5, 6]. Вычисли-

тельные затраты на реализацию взвешенного когерентного накопления невелики и составляют N операций умножения для кратности когерентного накопления N .

Для дальнейшего анализа были выбраны и рассмотрены весовые функции Блэкмена – Харриса, Чебышева, Кайзера, Наттола и Гаусса [4, 5] как обеспечивающие наибольшее подавление мешающих отражений при малом ослаблении сигнала в основной полосе пропускания. Параметры рассмотренных весовых функций приведены на рис. 3 (кривые 2 – 6) и в табл. 1. Параметры в таблице приведены для кратности когерентного накопления 500.

Таблица 1

Весовая функция	Максимальный относительный уровень боковых лепестков ДН, дБ	Ширина полосы пропускания, $\Delta f/f_s$
Естественное окно	-13.3	0.0034
Блэкмена – Харриса	-92	0.0073
Чебышева ($\beta=100$ дБ)	-100	0.0073
Кайзера ($\beta=16$)	-122.1	0.0083
Наттола	-98.1	0.0073
Гаусса ($\alpha=5$)	-129.1	0.01

Применение весовой обработки позволяет уменьшить уровень сигналов в дополнительных окнах прозрачности АЧХ фильтра, но в то же время расширяет основную полосу пропускания и снижает уровень сигнала в основной полосе. На рис. 4 показаны потери мощности рассеянного сигнала при взвешенном когерентном накоплении (1 – весовая функция Блэкмена – Харриса, 2 – Чебышева, 3 – Гаусса, 4 – Кайзера, 5 – Наттола). По эффективности подавления боковых лепестков АЧХ при минимальных потерях в полосе пропускания наиболее предпочтительна весовая функция Чебышева.

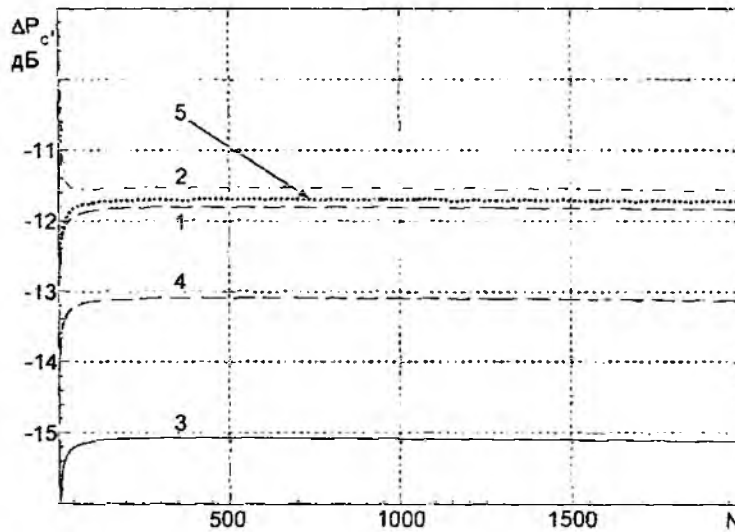


Рис. 4

Для весовых функций Чебышева, Кайзера и Гаусса, полученные характеристики зависят от дополнительного параметра. Для функции Чебышева параметр β имеет смысл максимального уровня боковых лепестков, функция Кайзера выражается формулой

$$w(n) = \frac{I_0 \left[\beta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot n - N - 1}{N - 1} \right)^2} \right]^2}{I_0(\beta)},$$

а функция Гаусса $w(n) = \exp(-(2 \cdot \alpha \cdot n / N)^2 / 2)$ [5]. Максимальное подавление сигналов в дополнительных окнах прозрачности АЧХ фильтра дости-

гается при увеличении значений этих параметров. При этом дополнительно расширяется полоса пропускания фильтра, и возрастают потери в полосе пропускания.

Эффективность методов подавления мешающих отражений в РЛС ВЗ дециметрового диапазона оценивалась методом имитационного моделирования. По результатам моделирования установлено, что для подавления мешающих отражений от ЛА со скоростями движения менее 50 м/с, требуется значительная кратность когерентного накопления, поскольку частотные составляющие сигнала, отраженного от летательного аппарата, попадают в область главного максимума АЧХ фильтра нижних частот. На рис. 5 приведен коэффициент подавления мешающих отражений для кратности накопления 500 (1 – отсутствие весовой обработки, 2 – весовая функция Блекмена-Харриса, 3 – весовая функция Чебышева для $\beta=100$ дБ, 4 – весовая функция Гаусса ($\alpha=5$), 5 – весовая функция Кайзера, 6 – весовая функция Наттола). Из рассмотренных весовых функций наилучшее подавление мешающих отражений обеспечивает функция Чебышева. На рис. 6 показан выигрыш в коэффициенте подавления мешающих отражений для скорости движения ЛА 75 м/с по сравнению с отсутствием взвешивания (1 – весовая функция Блекмена – Харриса, 2 – весовая функция Чебышева ($\beta=100$ дБ), 3 – весовая функция Гаусса ($\alpha=5$), 4 – весовая функция Кайзера, 5 – весовая функция Наттола).

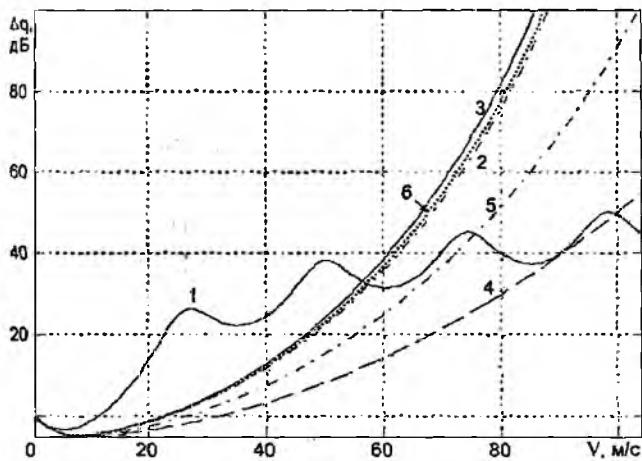


Рис. 5

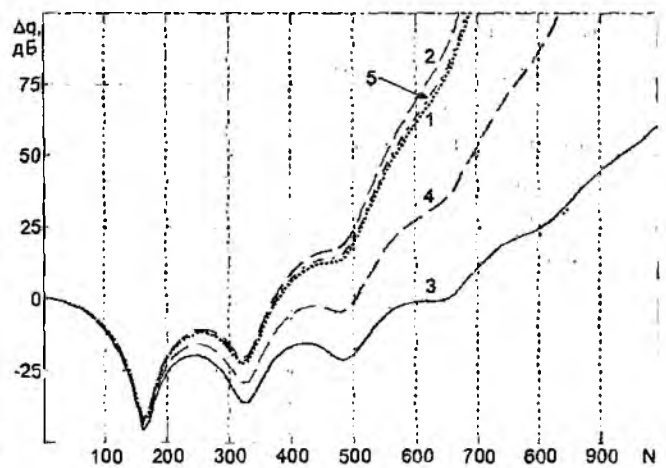


Рис. 6

Применение взвешенного когерентного накопления в сочетании с подавлением мешающих отражений боковыми лепестками ДН антенны позволяет обеспечить соблюдение рекомендуемых метрологических характеристик РЛС ВЗ.

Список литературы: 1. *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли* / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с. 2. *Отчет с резолюциями и рекомендациями* / Комиссия по основным системам всемирной метеорологической ассоциации. 23 февраля – 3 марта 2005 г., тринадцатая сессия. ВМО № 895, ISBN 92-63-40985-4. 3. *Справочник по радиолокации* / Под ред. М.Сколника: Пер. с англ. Под общ. ред. К.Н.Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С.Иццоки. М.: Сов. радио, 1976, 456с. 4. *Richard G. Lyons. Understanding digital signal processing*. Prentice-Hall, 2001, 518p. ISBN 0-201-63467-8. 5. *Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов*. 2-е изд. СПб.: Питер, 2006. 751с. 6. *Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье*. Ф.Дж.Хэррис. ТИИЭР №1, 1978, с.60-96.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.07.2008