

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕШАЮЩИЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИЗЕМНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Анализ требуемой для контроля при малых углах скольжения воздушной обстановки показывает, что современные радиолокационные средства обзора пространства осуществляют обнаружение, классификацию и сопровождение низколетящих летательных аппаратов на фоне маскирующих (мешающих) отражений и переотражений от неоднородностей атмосферы, приземных объектов и подстилающей поверхности. Поэтому подобные воздушные объекты, как правило, становятся малозаметными (МЗО) и улучшения наблюдаемости их радиолокационными средствами можно добиться применением эффективных средств и процедур выделения слабых сигналов на фоне мешающих отражений от неоднородностей приземной окружающей среды.

Особенностью мешающих отражений от неоднородностей приземной окружающей среды при малых углах скольжения является их дискретный пространственно-временной характер, проявляющийся в наличии в отдельных или нескольких ячейках разрешения коротко- и достаточно долгоживущих (от 0,1 с. до нескольких десятков секунд) помеховых всплесков. Возникновение таких всплесков связывают с отражениями от турбулентно перемешивающихся неоднородностей атмосферы и их переотражениями от неоднородностей подстилающей поверхности, вызывающих эффект «блестящего листа» – резкое возрастание эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) с одновременным затенением части ячеек разрешения за образующимися неоднородностями

При малых углах скольжения ($\Psi < 4^\circ$), что является характерным при наблюдении низколетящих воздушных объектов, отраженный неоднородной приземной средой сигнал имеет ряд особенностей. На малых дальностях (менее 10 км), помимо непрерывного «шумового» (фоновое) отражения, наблюдаются всплески, превышающие средний уровень сигнала на 10...15 дБ. [1]. С увеличением дальности отраженный сигнал приобретает ярко выраженный импульсный (дискретный) характер.

Результаты экспериментальных исследований статистических характеристик подобных дискретных мешающих отражений, которых еще называют дискретными мешающими отражениями (ДМО) типа «ангел – эхо», приведены в работах [1, 2]. Вероятность появления ДМО на уровне, превышающем на 6 дБ фоновые отражения на дальностях до 10 км, аппроксимирована распределением Пуассона со средней интенсивностью, лежащей в пределах 10... 12 мин⁻¹ до 6 – 8 мин⁻¹.

Пространственная частота появления ДМО в различных ячейках разрешения при тех же данных оцениваются величиной, соответствующей 4% от общего числа ячеек разрешения. Наиболее вероятные значения ЭПР МО лежат в пределах 0,1...0,4 м², при этом максимальные значения достигают 2...8 м², что сравнимо с ЭПР МЗО в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн. Длительности всплесков [1,2] находятся в пределах 6...10 с., однако максимальные достигают 60...80с. С учетом высокого разрешения радиолокационных средств малой и средней дальности (разрешение по дальности $\Delta D < 30$ м, по азимуту $\Delta\beta < 1^\circ$), длительности ДМО сравнимы, а иногда намного больше времени нахождения МЗО в одной ячейке разрешения (скорость движения 30...150 м).

Многочисленные экспериментальные исследования статистики радиолокационных отражений от приземной среды и от поверхности моря при малых углах скольжения и высоком разрешении РЛС показывают, что плотность распределения вероятностей отгибающей таких отражений наилучшим образом аппроксимируется либо распределением Вейбулла:

$$P(x) = \frac{\eta}{\sigma} \left[\frac{x}{\sigma} \right]^{\eta-1} \cdot e^{-\left[\frac{x}{\sigma} \right]^\eta},$$

где η и σ – параметры распределения, либо логарифмически нормальным распределением:

$$P(x) = \frac{1}{x \sigma_z \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\ln(x) - M_z]^2}{2\sigma_z^2}},$$

где M_z и σ_z^2 – среднее и дисперсия величины $\ln(x)$ соответственно. Отмечается [1, 3], что с умень-

шением углов скольжения статистику огибающей более адекватно описывает логарифмически-нормальное распределение. Отраженный от морской поверхности сигнал имеет в себе как бы две независимые составляющие – шумовую (фоновые отражения) и дискретную (всплески). Проявлением такого подхода является аппроксимация распределения мгновенных значений отраженного от морской поверхности сигнала составным нормальным распределением, а распределения огибающей, соответственно, составным рэлеевским. При этом соотношение дисперсий компонент (дискретной к шумовой) может достигать $k = 10 \dots 20$, а вес дискретной компоненты может доходить до 0,1.

Спектральные характеристики флуктуаций сигналов, отраженных от неоднородностей приземной окружающей среды, исследовались в ряде работ [1, 2, 3]. Ширина спектров флуктуаций ДМО для $\lambda = 10$ см и $\lambda = 3$ см при ясной, сухой погоде, измеренная весной в утреннее и вечернее время составляет соответственно, $\Delta f = 180 \dots 300$ Гц и $\Delta f = 600 \dots 1000$ Гц, что существенно больше ширины спектров эхо-сигналов МЗО (соответственно $\Delta f < 100$ Гц и $\Delta f < 300$ Гц). Центральное смещение спектров определяется силой ветра (волнение атмосферы), длиной волны РЛС и углом между направлением ветра и лучом РЛС и при скорости ветра $2 \dots 5$ м/с для $\lambda = 10$ см и $\lambda = 3$ см может достигать, соответственно, 120 Гц и 450 Гц. Энергетические спектры отраженных от неоднородностей приземной среды сигналов $G(f)$ существенно отличаются от гауссовских и наилучшим образом аппроксимируются функциями Баттерворта:

$$G_n(f) = \frac{G_{0n}}{1 + \left[\frac{f - f_{0n}}{\Delta f_n} \right]^n},$$

где G_{0n} – максимальное значение спектра на уровне 0,7; f_{0n} – центральная частота спектра на уровне 0,7; Δf_n – полуширина спектра на уровне 0,7, соответственно; n – показатель степени, лежащей в пределах от 2 до 5.

Отмечается также, что “мгновенные” спектры отличаются большой изменчивостью и изрезанностью. В моменты всплесков спектр ДМО значительно расширяется (до двух раз), при этом также возрастает центральное смещение спектров.

Рассмотренные особенности мешающих отражений от неоднородностей приземной среды при малых углах скольжения затрудняют анализ эффективности традиционных и синтез перспективных процедур обработки сигналов на фоне такого рода помех. Это обстоятельство обуславливает интенсивные попытки создания методик статистического моделирования радиолокационных ДМО, с помощью которых можно было бы производить исследование различных процедур обработки сигналов.

Все подходы к моделированию радиолокационных ДМО от неоднородностей приземной среды условно можно разделить на две группы. В первой группе исходной базой служит моделирование профилей отражающих и переотражающих поверхностей неоднородностей приземной среды с учетом атмосферных процессов и особенностей подстилающей поверхности земли и вычисление на этой основе по электродинамическим законам отраженного радиолокационного сигнала. Такие модели сложны, громоздки, требуют большого объема вычислений и, как правило, не обеспечивают всех требуемых характеристик объекта моделирования.

Вторую группу составляют те методы, где, не вдаваясь в физическую природу всех нюансов формирования отраженного приземной средой сигнала, пытаются смоделировать определенные выходные характеристики, полученные на основе экспериментальных исследований (функцию распределения вероятностей огибающей, корреляционные свойства и т.п.). Такие методы, как правило, являются более продуктивными. При этом чаще всего в основе моделирования лежит так называемый метод формирующего фильтра [4]. Его суть заключается в формировании требуемых корреляционных свойств моделируемого сигнала в некотором исходном нормальном базисе. Закон распределения огибающей обеспечивается последующим нелинейным преобразованием исходного коррелированного базиса. Недостатком такого подхода является деформация выходных корреляционных свойств моделируемого сигнала из-за нелинейных преобразований.

С целью преодоления этого недостатка была разработана методика статистического моделирования мешающих отражений от неоднородностей приземной среды при малых углах скольжения. В качестве объекта моделирования был выбран массив цифровых отсчетов комплексной огибающей имитирующей пачку отраженных сигналов в обзорных РЛС:

$$\dot{Y}_i = y_i \cdot \exp\{j\varphi_i\}, \quad i = \overline{1, N},$$

где i – номер посылки зондирующего импульса; y_i – отсчеты действительной амплитуды; φ_i – отсчеты действительной фазы, соответственно; N – объем пачки.

Выбор такого объекта позволяет использовать разработанную методику для анализа эффективности широкого класса процедур обработки сигналов как во временной, так и в частотной области. В отличие от известных реализаций метода формирующего фильтра, формирование комплексного массива \dot{Y}_i производится не через квадратурные составляющие, а непосредственно через раздельное моделирование массивов действительной амплитуды y_i и φ_i фазы. Подобный подход содержит в себе определенную методологическую некорректность. Эта некорректность заключается в том, что случайный разброс скоростей отдельных фрагментов (“блестящих точек”) отражающих поверхностей неоднородности атмосферы и подстилающей поверхности является общим источником флуктуаций и фазы, и амплитуды отраженных сигналов [1, 2]. Поэтому раздельный анализ статистики амплитуды и фазы является вполне правильным и естественным.

Массив отсчетов действительной амплитуды y_i формируется как коррелированная стационарная последовательность логнормального распределения чисел. При этом следует оговориться, что отражения неоднородностей приземной среды, вообще говоря, не являются стационарным случайным процессом [1,2]. Вместе с тем в работе [2] указывается, что на интервалах наблюдения до 3... 20 мс (а это как раз примерно длительность пачки в большинстве РЛС малой и средней дальности отраженный неоднородностями приземной среды сигнал можно считать стационарным).

Корреляционные свойства последовательности y_i строятся в соответствии с экспоненциальной автокорреляционной функцией (АКФ) $R(\tau)$, которая является преобразованием Фурье энергетического спектра в виде функции Баттерворта второго порядка:

$$R(\tau) = \exp\{-2\pi\Delta f_n|\tau|\}. \quad (1)$$

Соображения о физической реализуемости случайного процесса, описывающего мешающие отражения, требуют отсутствия разрыва в точке ($\tau = 0$) у второй производной АКФ. Вместе с тем, смешивание некоррелированного шума приемника и мешающих отражений от неоднородностей приземной среды как раз и приводит (при определенном соотношении их дисперсий) к резкому обострению АКФ в точке ($\tau=0$). Эти соображения дают основания для использования при моделировании экспоненциальной АКФ.

В дискретном виде, когда шаг Δt дискретизации равен периоду следования зондирующих импульсов T_{cl} $R(\tau)$ выражается соотношением:

$$R(\tau) \rightarrow R_m = \exp\{-2\pi\Delta f_n T_{cl}|m|\} = R^{|m|}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \quad (2)$$

где $R = \exp\{-2\pi\Delta f_n T_{cl}\}$ – коэффициент корреляции мешающих отражений неоднородностей приземной среды. Логнормальный закон распределения элементов последовательности y_i обеспечивается потенцированием нормально распределенной коррелированной последовательности Z_i : $y_i = \exp\{Z_i\}$.

Можно показать, что для того, чтобы корреляционные свойства последовательности y_i выражались экспоненциальной АКФ в виде (1), необходимо, чтобы корреляционные свойства последовательности Z_i определялись АКФ следующего вида:

$$R_m = \ln[\exp\{\sigma_Z^2\} - 1] \cdot \exp\{-2\pi\Delta f_n T_{cl}|m| + 1\} / \sigma_Z^2. \quad (3)$$

Формированием нормально распределенной последовательности Z_i с АКФ в виде (3) производится на основе метода скользящего весового суммирования [4]. Размер скользящего окна и параметры весовых коэффициентов были определены на основе численной аппроксимации по методу наименьших квадратов АКФ моделируемой последовательности выражения (3).

Элементы массива отсчетов фазы формируется как накопленный межпериодный доплеровский набег фазы радиолокационных отражений от неоднородностей приземной среды: $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi_i$, где $\Delta\varphi_i$ – нормально распределенные некоррелированные числа, среднее и дисперсия которых определяются центральным смещением и шириной доплеровского спектра радиолокационных отражений от неоднородностей приземной среды.

Для того, чтобы при моделировании более адекватно воспроизводились особенности спектральных характеристик отражений от неоднородностей приземного слоя, в частности, расширение и развал спектра в моменты появления дискретных мешающих отражений (ДМО) типа “ангел-эхо”, дис-

персия межпериодного доплеровского набега фазы σ_φ^2 искусственно ставится в зависимость от среднего значения в сформированной пачке амплитуды (от выборочного среднего элементов y_i) – так чтобы при появлении МО в 10 дБ среднеквадратичное отклонение фазы σ_φ увеличивалось в два раза:

$$\delta_\varphi = \begin{cases} 2\pi\Delta f_{\Pi} T_{\text{ср}}, & \text{если } \sum_{i=1}^N y_i / N \cdot M_y \leq 1 \\ 2\pi\Delta f_{\Pi} T_{\text{ср}} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N y_i / N \cdot M_y + \frac{1}{2} \right), & \text{если } \sum_{i=1}^N y_i / N \cdot M_y > 1, \end{cases}$$

где $M_\mu = \exp \{M_Z + \sigma_Z^2/2\}$ – среднее логнормально распределенной огибающей радиолокационных отражений от неоднородностей приземной среды; N – объем пачки.

Калибровка статистической модели по реальным записям радиолокационных отражений от неоднородностей приземной среды показала хорошее воспроизведение основных статистических и спектральных характеристик. Воспроизводимость закона распределения вероятностей амплитуд помех от приземного слоя неоднородной атмосферы по предложенной методике обеспечивается функциональным преобразованием нормальных случайных величин в логнормальные путем потенцирования первых.

При этом важно отметить, что логнормальный закон распределения амплитуды автоматически приводит к появлению среди моделируемых пачек “всплесков” дискретных мешающих отражений (ДМО) типа “ангел-эхо”. Интенсивность и частота появления этих всплесков определяются параметрами M_Z и σ_Z – распределения амплитуды и соответствуют экспериментальным данным.

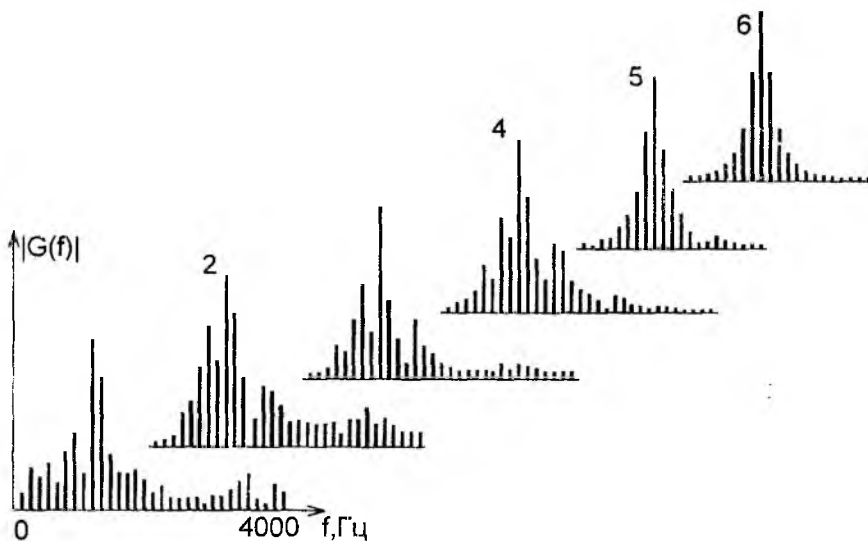


Рис. 1.

Для иллюстрации воспроизводимости при моделировании пространственно-временной дискретной структуры радиолокационных мешающих отражений от неоднородностей атмосферы в приземном слое на рис. 1 приведены мгновенные и усредненные спектры смоделированных и реальных мешающих сигналов, снятых по выходам фазовых детекторов РЛС.

Спектры 1 и 2 получены с использованием N -точечного дискретного преобразования Фурье 2-х пачек комплексной амплитуды y_i ($i = 1, N$), смоделированных при следующих параметрах – $R = \exp\{-2\pi \Delta f_n / F_{\text{ср}}\} = 0,9$; $\sigma_Z = 2$; $N = 64$. Причем спектр 1 соответствует по интенсивности фону, а спектр 2 – ДМО типа «ангел-эхо». Спектры 3, 4 взяты из экспериментальных данных и соответствуют спектрам межпериодных флуктуаций по выходу фазового детектора импульсно-доплеровских РЛС сантиметрового диапазона. Спектр 5 получен усреднением 100 энергетических спектров сигналов, смоделированных при тех же условиях, что и сигналы со спектрами 1 и 2. Для сравнения приведен энергетический спектр 6, описываемый функцией Баттворта второго порядка при $R = 0,9$.

Усредненный энергетический спектр (5) смоделированных сигналов с уровнем значимости выше 0,95 аппроксимирует требуемый энергетический спектр (6) помеховых отражений от неоднородно-

стей приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности, что говорит о достаточно высокой точности воспроизведения спектральных характеристик.

Представленные результаты показывают хорошую воспроизводимость статистических и спектральных свойств мешающих отражений от неоднородностей атмосферы и подстилающей поверхности приземной среды при моделировании по разработанной методике, и следовательно, возможность на ее основе проводить исследования различных алгоритмов обработки радиолокационных сигналов.

Таким образом, анализ особенностей радиолокационных отражений от неоднородностей атмосферы и приземной среды при малых углах скольжения показывает, что задача эффективного обнаружения воздушных целей сводится к задаче выделения слабых сигналов на фоне ДМО.

Список литературы: 1. *Жирнов В. В., Литвинов В. В., Филошкин И. П.* Особенности обработки и обнаружения радиолокационных сигналов целей на фоне дискретных мешающих отражений типа «ангел-эхо» // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. К. 1991. Вып. 29. С. 83–88. 2. *Жирнов В. В., Литвинов В. В., Филошкин И. П.* Адаптивная схема стабилизации уровней фона при использовании методов картинной обработки в обзорных РЛС // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. К. 1991. Вып. 29. С. 78–83. 3. *Дохов А.И., Жирнов В.В., Матюшенко С.Н., Сахновская Л.З.* Возможные причины и источники радиолокационных мешающих отражений типа «ангел-эхо» // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Харьков. 1997. Вып. 104. С. 102–111. 4. *Дохов А.И., Жирнов В.В., Матюшенко С.Н., Сахновская Л.З.* Принципы защиты радиопеленгаторов условиях воздействия мешающих отражений типа «ангел – эхо». // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научн.–техн. сборник.– Харьков. 1997. Вып. 104. С. 112 – 119.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 12.09.01