

Зависимость информативности импульсных характеристик воздушных объектов от расположения импульсных откликов

Майоров Д.А.,^{1*}Шемяков А.О.^{2}**

*¹Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил
Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского,
ул. Котовского, 2, Смоленск, 214027, Россия*

*²Московский авиационный институт (национальный исследовательский универси-
тет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail:d-mayorov@mail.ru*

***e-mail:a.shemyakov@gmail.com*

Аннотация

Вскрыты и описаны факторы, вносящие дополнительные искажения в импульсную характеристику воздушного объекта, формируемую из отраженной пачки с поимпульсной перестройкой несущей частоты. Исследована степень проявления этих факторов в структуре импульсной характеристики в зависимости от положения момента опорного времени и взаимного положения рассеивающих центров между собой в продольном направлении. Оценены величины возникающих искажений импульсных откликов. Выработаны рекомендации по снижению влияния исследованных негативных факторов.

Ключевые слова: частотная характеристика, импульсная характеристика, сигналы с перестройкой частоты, импульсный отклик.

Поимпульсная перестройка несущей частоты относится к одному из перспективных направлений развития радиолокации [1]. Применение поимпульсной перестройки частоты по случайному закону совместно с изменением периода повторения зондирующих сигналов (ЗС) позволяет снизить влияние как традиционных, так и перспективных видов помех. Кроме повышения помехоустойчивости использование поимпульсной перестройки частоты улучшает разрешающую способность по дальности [2], что позволяет использовать сигналы с перестройкой частоты (СПЧ) для решения задачи идентификации воздушных объектов (ВО) на основе построения их импульсных характеристик (ИХ), в которых каждому отклику соответствует определенный рассеивающий центр (РЦ) освещенной поверхности ВО [3–7].

Импульсная характеристика представляет собой распределение амплитуд импульсных откликов от РЦ поверхности объекта по разрешаемым элементам на оси времени [8]. Она имеет дискретную структуру. При этом число временных отсчетов («дискретов») в ИХ, полученной из отраженной пачки СПЧ, равно количеству СПЧ в пачке. Интервал между временными отсчетами ИХ определяется разрешающей способностью по времени, которая зависит от значения диапазона перестройки несущей частоты ΔF .

Дискретный характер ИХ оказывает существенное влияние на ее информативность. При попадании отклика от РЦ между дискретами структура ИХ искажается.

Это снижает качество ИХ как сигнального признака распознавания и влияет на эффективность процесса идентификации ВО.

Целью работы является выявление особенностей формирования импульсных характеристик ВО в зависимости от взаимного расположения РЦ в радиальном направлении и параметров перестройки частоты. Учет указанных особенностей при анализе ИХ может позитивно сказаться на качестве идентификации ВО.

При поимпульсной перестройке несущей частоты ЗС представляет собой последовательность пачек из N импульсов длительностью τ_i , каждый из которых имеет свою частоту, не повторяющуюся в пределах одной пачки и изменяющуюся по некоторому закону. Количество используемых частот равно числу импульсов в пачке N . Значения частот выбираются из диапазона $[f_0; f_0 + \Delta F]$, где ΔF – диапазон перестройки частоты с шагом перестройки $\Delta f = \Delta F / (N - 1)$. Очевидно, что наибольшую помехоустойчивость режима обеспечивает последовательность пачек импульсов, частота которых изменяется по своему случайному закону в каждой пачке. В качестве примера на рисунке 1 изображен вид ЗС, состоящего из последовательностей пачек по 8 импульсов ($N=8$) с периодом повторения импульсов T_i и периодом повторения пачек T_p . Частота импульсов в пачках изменяется по случайному закону. Закон перестройки для каждой пачки различен.

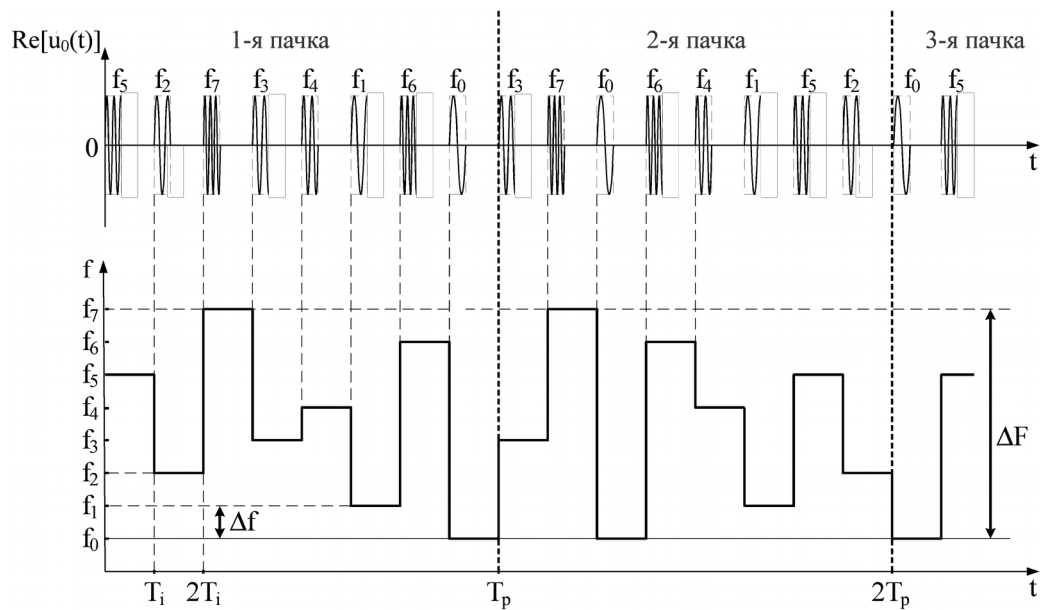


Рис. 1. Вид сигнала со случайным законом перестройки частоты для $N=8$

Согласованная фильтрация импульсов n -й частоты $f_n=f_0+n\Delta f$ из состава одной пачки СПЧ, отраженных от многоточечного ВО, позволяет получить частотную характеристику (ЧХ) ВО [4, 8], которая представляет собой совокупность откликов согласованных приемников на отраженные сигналы разных частот из состава пачки в определенный момент времени. Такое математическое представление отраженных от ВО импульсов является удобным, так как позволяет проводить цифровое когерентное сложение СПЧ с помощью обратного преобразования Фурье (ОПФ) ЧХ [9]. После устранения фазовых набегов, связанных с радиальным перемещением ВО, указанная операция позволяет получить и ИХ ВО (совокупность откликов РЦ объекта на воздействие в виде дельта-функции). Этим и определяется термин *частотная характеристика*, обратное преобразование Фурье которой позволяет получить ИХ ВО.

Порядок формирования ЧХ поясняется рисунком 2, на котором изображены отклики согласованного приемника на сигналы разных частот из состава пачки из 64

вождения, когда дальность до ВО известна. Для режима обнаружения, когда дальность до ВО неизвестна, целесообразно разбивать весь интервал дальностей, на котором ведется обнаружение ВО, на дальностные каналы.

В интересах упрощения дальнейших рассуждений введем обозначение $\Delta R_m = R_m - R_d$ как радиальное расстояние между точкой опорной дальности и m -м РЦ. Соответственно, под обозначением $\Delta t_m = t_{dm} - t_d$ будем понимать разницу между опорным временем и временем запаздывания сигнала, отраженного от m -го РЦ. При таком подходе n -й член ЧХ ВО, полученный на n -й частоте в момент опорного времени t_d , описывается выражением [10, 11]

$$\dot{u}_n(t_d) = K(n) \tau_i \operatorname{sinc}(\pi F_{dn} \tau_i) \sum_{m=1}^M C_0(t_d, t_{dm}) E_m \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_n}{c} \Delta R_m - V_r \left(t_d + \frac{\tau_i}{2} + \tilde{n} T_i \right) - \psi_m \right\}.$$

где $K(n)$ – коэффициент, определяемый свойствами приемника РЛС при обработке сигнала n -й частоты; $F_{dn} = 2V_r f_n / c$ – доплеровское смещение n -й частоты при ра-

диальной скорости ВО V_r ; $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$; $C_0(t, t_{dm}) = \begin{cases} 1 - \frac{|t - t_{dm}|}{\tau_i}, & |t - t_{dm}| \leq \tau_i; \\ 0, & |t - t_{dm}| > \tau_i \end{cases}$ –

корреляционная функция закона модуляции простого прямоугольного радиоимпульса; E_m – амплитуда сигнала, отраженного от m -го РЦ, пропорциональная его эффективной площади рассеяния (ЭПР); \tilde{n} – порядковый номер излучения импульса на n -й частоте, определяемый законом перестройки частоты из диапазона $[0 \dots (N-1)]$; ψ_m –

величина фазы отраженного сигнала, обусловленная отражением импульса от m -го РЦ.

Проведение обратного преобразования Фурье ЧХ неподвижного ВО позволяет получить его ИХ, состоящую из N дискретных импульсных откликов (дискретов). Ситуацию гипотетической неподвижности ВО можно обеспечить путем компенсации негативного влияния фазовых набегов, связанных с радиальным перемещением ВО с учетом закона перестройки частоты. Для этого перед проведением ОПФ необходимо проводить перефазирование ЧХ (фазовую фокусировку) и расстановку принятых сигналов в порядке линейно-ступенчатого возрастания частоты, что обеспечивается запоминанием закона перестройки. Подробно этот процесс описан в [12–14].

На рисунке 3 показана ИХ описанной выше модели восьмиточечного ВО в условиях отсутствия помех и шумов. Точка опорной дальности выбрана на удалении первого РЦ ($t_d=2R_1/c$). Отклик от этого РЦ расположен в нулевом временном дискрете ИХ. Для рассматриваемого случая $\Delta R_1=0$ м ($\Delta t_1=0$ с), $\Delta R_2=14$ м ($\Delta t_2=93,3$ нс), $\Delta R_3=16$ м ($\Delta t_3=106,7$ нс), $\Delta R_4=18$ м ($\Delta t_4=120$ нс), $\Delta R_5=21$ м ($\Delta t_5=140$ нс), $\Delta R_6=30$ м ($\Delta t_6=200$ нс), $\Delta R_7=50$ м ($\Delta t_7=333,3$ нс), $\Delta R_8=56$ м ($\Delta t_8=373,3$ нс). В интересах упрощения ЭПР каждого РЦ принималась равной 1 м². На рисунке 3 под переменной Δt понимается временное смещение относительно момента опорного времени t_d .

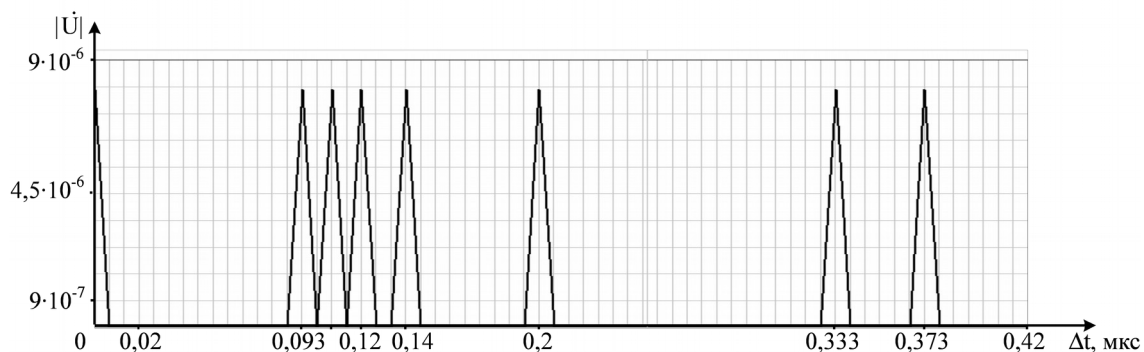
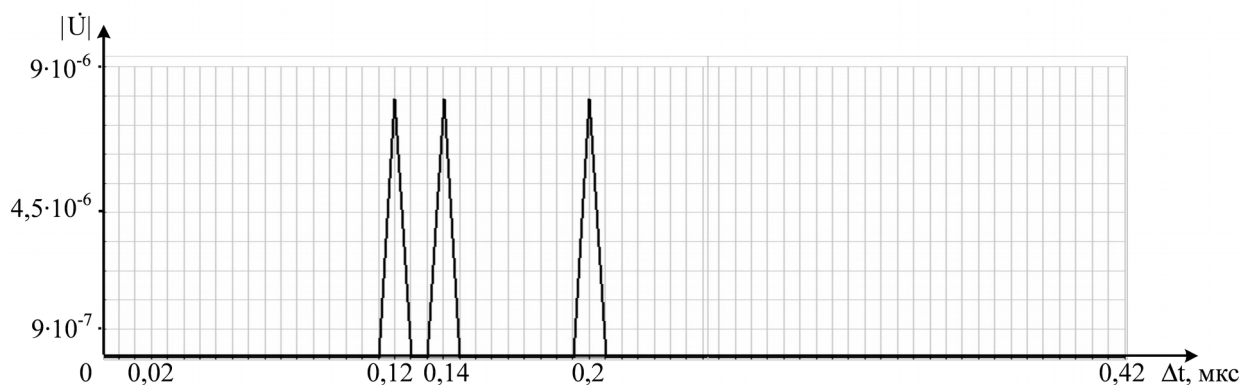


Рис. 3. Импульсная характеристика ВО

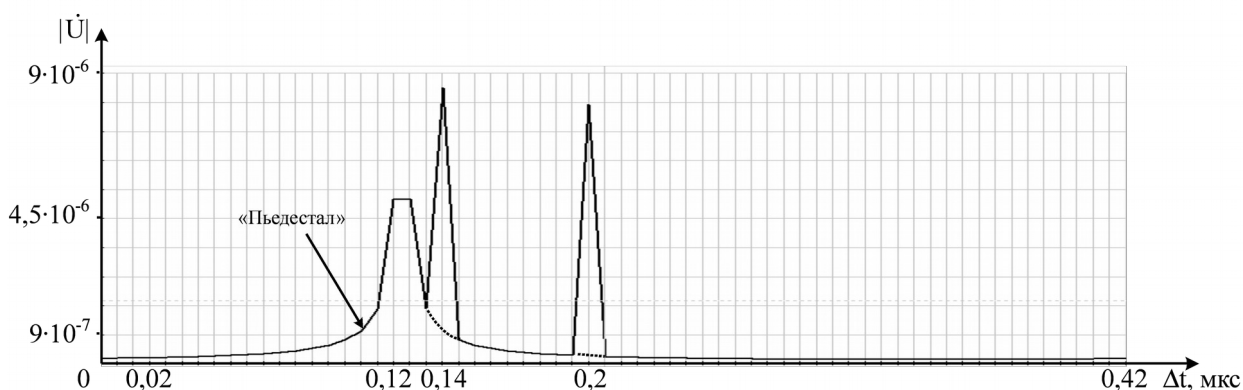
Интервал между дискретами ИХ определяется разрешающей способностью по времени $\delta\tau$ и обратно пропорционален диапазону перестройки частоты ΔF : $\delta\tau = 1/\Delta F$ [7, 9]. Для рассматриваемого случая ($\Delta F=150$ МГц) величина временного дискрета $\delta\tau$ равна 6,6(6) нс. Из анализа рисунка 3 видно, что амплитудно-временные отклики ИХ характеризуют реальное расположение РЦ рассматриваемого ВО относительно момента опорного времени. Временное окно, в котором располагаются элементы ИХ, имеет ширину $\Delta\tau_{ИХ} = (N-1)\delta\tau = 420$ нс. В рассмотренном случае временной сдвиг между моментом опорного времени и рассеивающими центрами кратен разрешающей способности. Если указанный временной сдвиг не кратен $\delta\tau$ (в случае попадания отклика РЦ между временными отсчетами), структура ИХ искажается. Для примера на рисунке 4 показаны ИХ двух моделей ВО, состоящих из трех РЦ с ЭПР 1 м^2 каждый в условиях отсутствия помех и шумов при $N=64$, $\Delta F=150$ МГц, $t_d=100$ мкс:

первая модель – $\Delta t_1=120$ нс ($\Delta R_1=18$ м), $\Delta t_2=140$ нс ($\Delta R_2=21$ м), $\Delta t_3=200$ нс ($\Delta R_3=30$ м) – фрагмент «а» рис. 4;

вторая модель – $\Delta t_1=123,3$ нс ($\Delta R_1=18,5$ м), $\Delta t_2=140$ нс ($\Delta R_2=21$ м), $\Delta t_3=200$ нс ($\Delta R_3=30$ м) – фрагмент «б» рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Искажение ИХ модели ВО при смещении одного РЦ

Анализ рисунка 4 позволяет сделать вывод о том, что при смещении одного из РЦ на 0,5 м (3,3 нс) отклик от него в ИХ становится шире, а его амплитуда – меньше, хотя ЭПР рассеивающего центра не изменялась. При этом у отклика появляется своеобразный «пьедестал», распределенный по всей ширине окна ИХ. На рисунке 5 представлена зависимость амплитуды отклика первого РЦ в 18-м и 19-м дискретах от его смещения относительно момента опорного времени Δt .

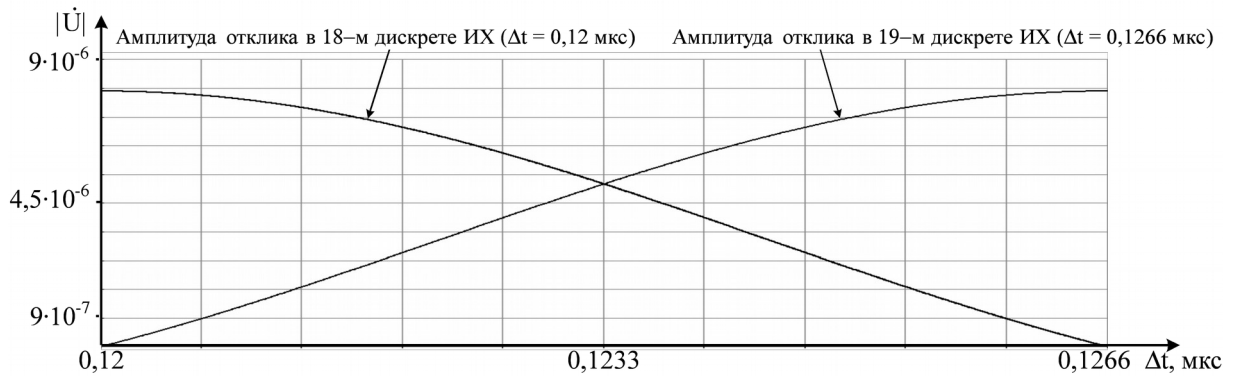


Рис. 5. Изменение амплитуды отклика от первого РЦ в зависимости от его смещения относительно момента опорного времени

В случае попадания РЦ между отсчетами ИХ при увеличении Δt отклик от него плавно «перетекает» из одного дискрета в другой. Если РЦ размещен строго посередине между дискретами, амплитуда его отклика в обоих отсчетах ИХ будет равна. На рисунке 6 представлена зависимость суммарной амплитуды отклика от первого РЦ в двух соответствующих смежных отсчетах ИХ (18-м и 19-м) от Δt .

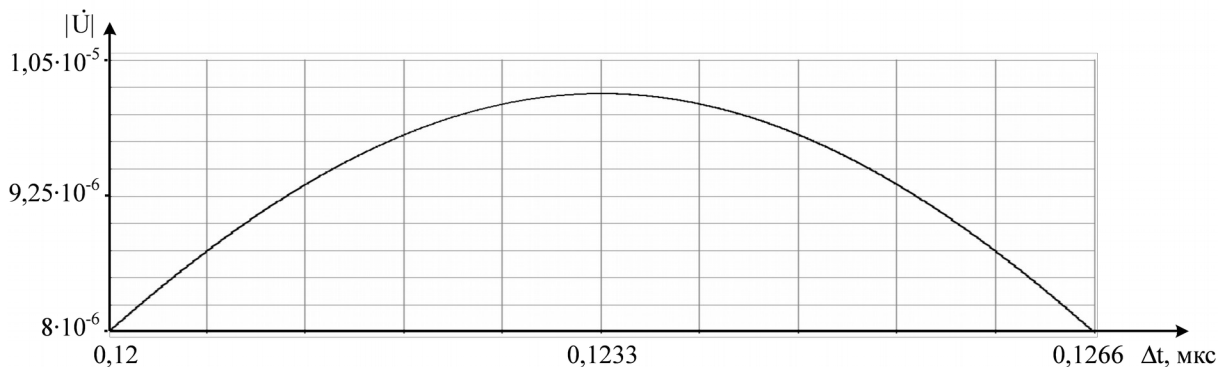


Рис. 6. Суммарная амплитуда отклика от первого РЦ в двух соседних отсчетах ИХ

При попадании в один дискрет ИХ двух РЦ амплитуда суммарного отклика будет зависеть от расстояния между ними. При этом она может как увеличиться почти в 2 раза, так и уменьшиться практически до нуля. Это явление объясняется принципом

интерференции и законом наложения фаз сигналов, отраженных от разных РЦ. Было установлено, что зависимость амплитуды отклика РЦ от Δt носит затухающий периодический характер. Для примера на рисунке 7 представлена зависимость амплитуды суммарного отклика от двух РЦ в 18-м дискрете ИХ ($\Delta t = 120$ нс) от временного смещения первого РЦ относительно момента опорного времени Δt_1 . При этом временное смещение второго РЦ оставалось неизменным и составляло $\Delta t_2 = 0,1227$ мкс (18,4 м).

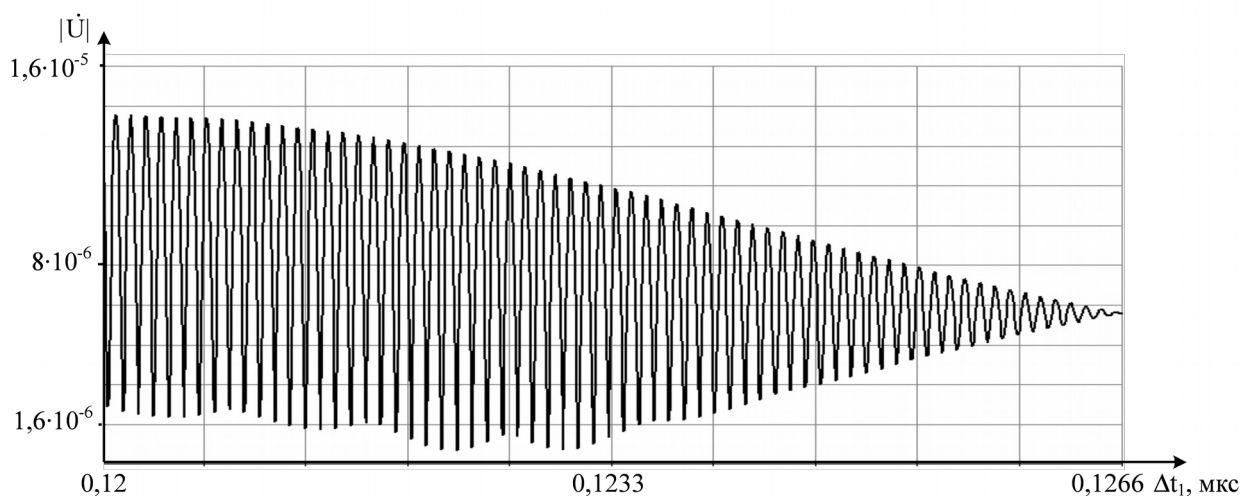


Рис. 7. Зависимость амплитуды суммарного отклика от двух РЦ в одном дискрете

В ходе исследований было выяснено, что смещение одного РЦ относительно других также оказывает влияние на амплитуду откликов РЦ, находящихся в других дискретах ИХ. Для примера на рисунке 8 показана зависимость амплитуды отклика второго РЦ в 21-м дискрете ИХ (модель ВО представлена на рисунке 4) от временного смещения первого РЦ относительно момента опорного времени. Данная зависимость также носит периодический характер.

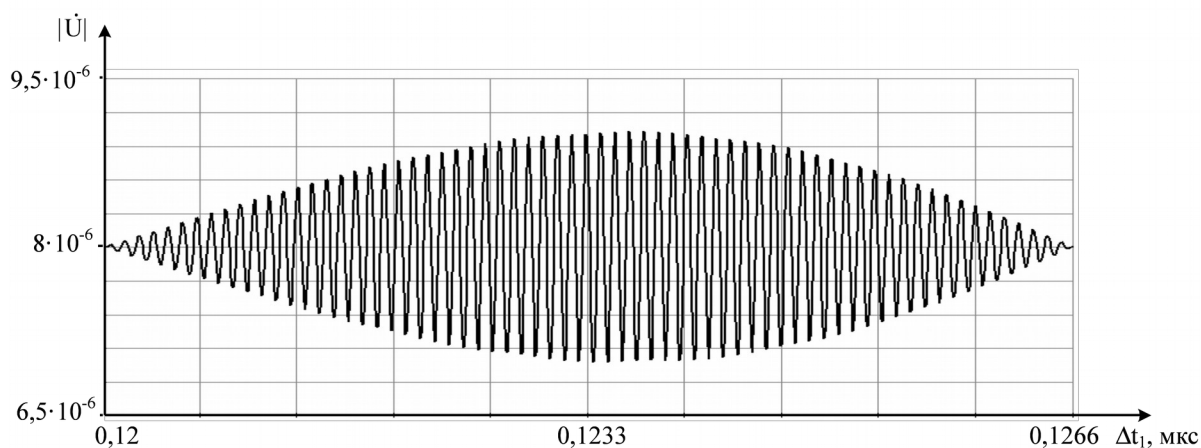


Рис. 8. Зависимость амплитуды отклика второго РЦ от Δt_1

Исследование зависимости амплитуды отклика третьего РЦ в 30-м дискрете ИХ от Δt_1 показало, что она носит аналогичный характер (рис. 8), однако диапазон изменения амплитуды отклика значительно уменьшился. На основе сравнения результатов был сделан вывод о зависимости амплитуды отклика РЦ в ИХ от взаимного расположения соседних РЦ: чем дальше расположен РЦ, тем меньшее влияние на колебания амплитуды его отклика оказывает наличие других РЦ. Дополнительные исследования подтвердили данное утверждение.

Таким образом, можно сформулировать промежуточные выводы:

а) попадание РЦ между дискретами ИХ приводит к ее искажению, выражающемуся в снижении амплитуды отклика от РЦ, распределении амплитуды отклика от одного РЦ на два дискрета ИХ и появлении у отклика своеобразного «пьедестала», распределенного по всей ширине окна ИХ;

б) смещение хотя бы одного РЦ относительно других по дальности приводит к изменению амплитуды их откликов в ИХ, которое носит периодический характер; при

этом чем дальше расположены РЦ друг от друга, тем меньшее влияние на колебания амплитуды откликов соседних РЦ они оказывают.

Описанных искажений ИХ можно избежать путем увеличения диапазона перестройки частоты ΔF , которое повлечет за собой повышение разрешающей способности. Например, увеличение ΔF в два раза во столько же раз уменьшит величину дискрета ИХ, а следовательно, и ширину «окна» ИХ при неизменном количестве импульсов в пачке СПЧ (дискретов ИХ). В этом случае для сохранения ширины «окна» ИХ на прежнем уровне необходимо в два раза увеличить количество импульсов в пачке, что приведет к увеличению числа дискретов ИХ.

Для примера на рисунке 9 показана ИХ, построенная путем обработки пачки из 128 сигналов с перестройкой частоты ($N=128$) при $\Delta F=300$ МГц, $t_d=100$ мкс для модели ВО, представленной на фрагменте «б» рис. 4 – $\Delta t_1=123,3$ нс ($\Delta R_1=18,5$ м), $\Delta t_2=140$ нс ($\Delta R_2=21$ м), $\Delta t_3=200$ нс ($\Delta R_3=30$ м).

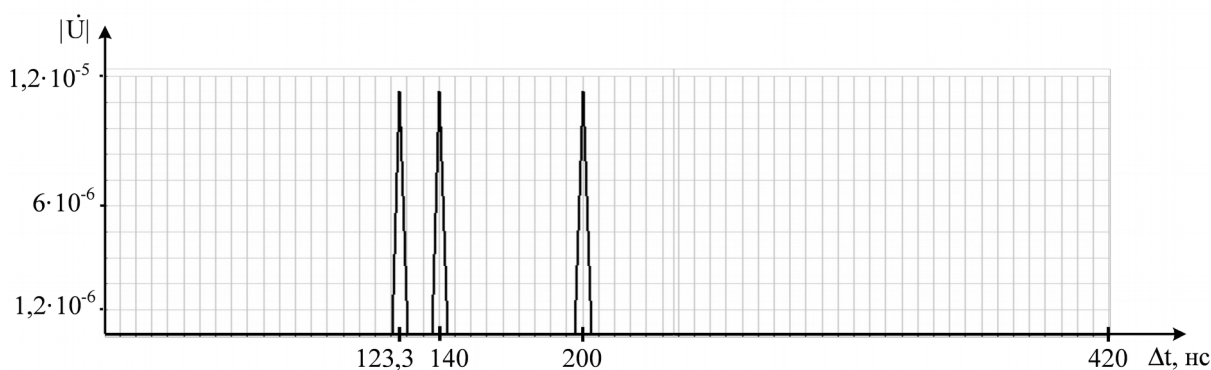


Рис. 9. Устранение искажений ДП при увеличении ΔF и N

При использованных параметрах временной сдвиг между моментом опорного времени и откликом первого РЦ стал кратен разрешающей способности. Сравнение рисунков 4 «б» и 10 позволяет сделать вывод о том, что увеличение ΔF и N в дан-

ном случае повышает информативность ДП. Негативный «пьедестал» первого РЦ исчез, а амплитуда отклика этого РЦ приняла значение, пропорциональное его ЭПР. Следует отметить что, увеличение количества импульсов пачки в два раза приводит к пропорциональному увеличению амплитуды откликов от РЦ в $\sqrt{2}$ раз. Это объясняется повышением накапливаемой откликами энергии за счет увеличения числа когерентно складываемых импульсов из состава пачки СПЧ.

Для получения наиболее информативной ИХ необходимо максимально увеличивать диапазон перестройки частоты и количество импульсов в пачке СПЧ. Однако существуют некоторые ограничения. Во-первых, величина диапазона перестройки частоты ограничена возможностями радиотехнической аппаратуры, в частности – техническими характеристиками синтезаторов частот и величиной полосы пропускания приемо-передающих антенн и приемных устройств (на практике эта величина не превышает нескольких сотен мегагерц). Во-вторых, увеличение количества импульсов в пачке СПЧ приведет к увеличению ее длительности. Известно, что для пренебрежения рысканиями планера ВО в турбулентной атмосфере и связанным с ними изменением дальности до РЦ длительность одной пачки СПЧ $\Delta T_p = (N-1)T_i$ не должна превышать интервала угловой корреляции ВО $T_{ук}$ [12, 13]. Следовательно, число импульсов в пачке СПЧ (количество используемых частот) должно определяться в следующей последовательности:

на основе технических характеристик РЛС выбирается допустимый диапазон перестройки частоты ΔF (сотни мегагерц);

в зависимости от класса сопровождаемых ВО выбирается ширина окна ИХ $\Delta\tau_{ИХ} \approx 2R_{\parallel}/c$ (для крупноразмерных и среднеразмерных ВО величина R_{\parallel} составляет десятки метров, для малоразмерных – единицы метров);

в зависимости от типа решаемой РЛС задачи выбирается длительность импульсов τ_i и скважность Q ;

число импульсов в пачке N определяется исходя из условия:

$$(\Delta\tau_{ИХ} \Delta F + 1) < N < [T_{ук}/(Q\tau_i) + 1].$$

На практике, при построении ИХ довольно редко наблюдается смещение только одного РЦ по оси времени относительно дискрета ИХ. Как правило, расстояние между РЦ за время построения ИХ не изменяется. Но при движении ВО изменяется временное смещение всех РЦ относительно момента опорного времени. В связи с этим на следующем этапе исследования проводился анализ особенностей построения ИХ при попадании нескольких РЦ между дискретами ИХ. В ходе исследований было установлено, что при попадании откликов от нескольких РЦ между различными отсчетами ИХ характер изменения их амплитуды аналогичен изменениям амплитуды одиночного отклика от РЦ: чем меньше временное смещение отклика РЦ от дискрета ИХ, тем больше его амплитуда. Для примера на рисунке 10 представлена ИХ модели ВО, состоящей из трех РЦ с ЭПР 1 м^2 каждый в условиях отсутствия помех и шумов при $N=64$, $\Delta F=150 \text{ МГц}$, $t_d=100 \text{ мкс}$, $\Delta t_1=123,33 \text{ нс}$ ($\Delta R_1=18,5 \text{ м}$), $\Delta t_2=141,13 \text{ нс}$ ($\Delta R_2=21,17 \text{ м}$), $\Delta t_3=202,6 \text{ нс}$ ($\Delta R_3=30,39 \text{ м}$).

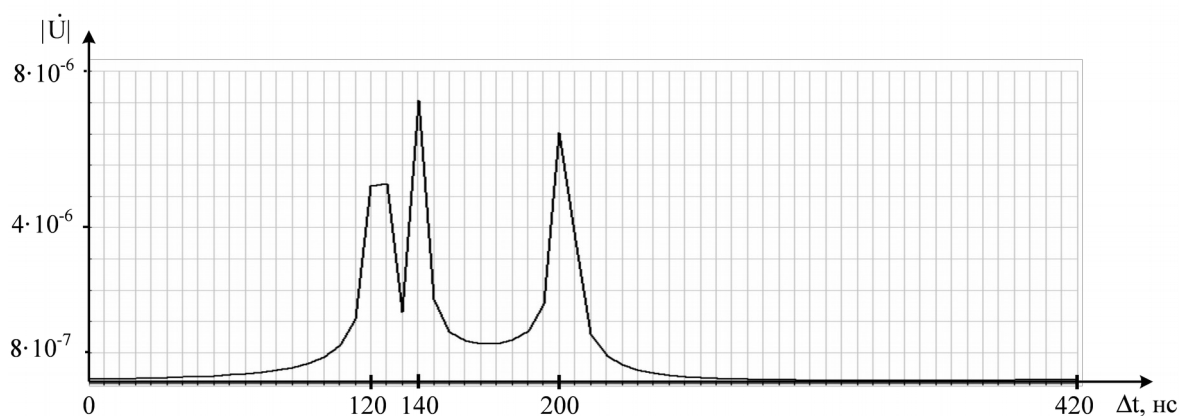


Рис. 10. Вид ИХ ВО при смещении всех РЦ относительно дискретов ИХ

Как и в ИХ рисунка 4 при попадании РЦ между дискретами отклики от РЦ становятся шире, а их амплитуда – меньше, хотя ЭПР рассеивающих центров не изменялись. При этом у каждого отклика появляются своеобразные «пьедесталы», которые суммируются и распределяются практически по всей ширине окна ИХ. Параметры «пьедесталов» для каждой ситуации уникальны. Закономерным является только их взаимное усиление при совпадении по времени.

На следующем этапе исследований был проведен анализ изменения амплитуд откликов от РЦ при перемещении ВО в радиальном направлении относительно точки опорной дальности. Сделан вывод, что при перемещении ВО ровно на целое число элементов разрешения вид ИХ ВО остается неизменным. Разница заключается лишь во временном положении откликов от РЦ в окне просмотра ИХ. На рисунке 11 показана зависимость амплитуды откликов РЦ в соседних дискретах от их удаленности от исходной точки (положение ВО в исходной точке представлено на рисунке 10) при перемещении ВО на один элемент разрешения (на 6,6 нс).

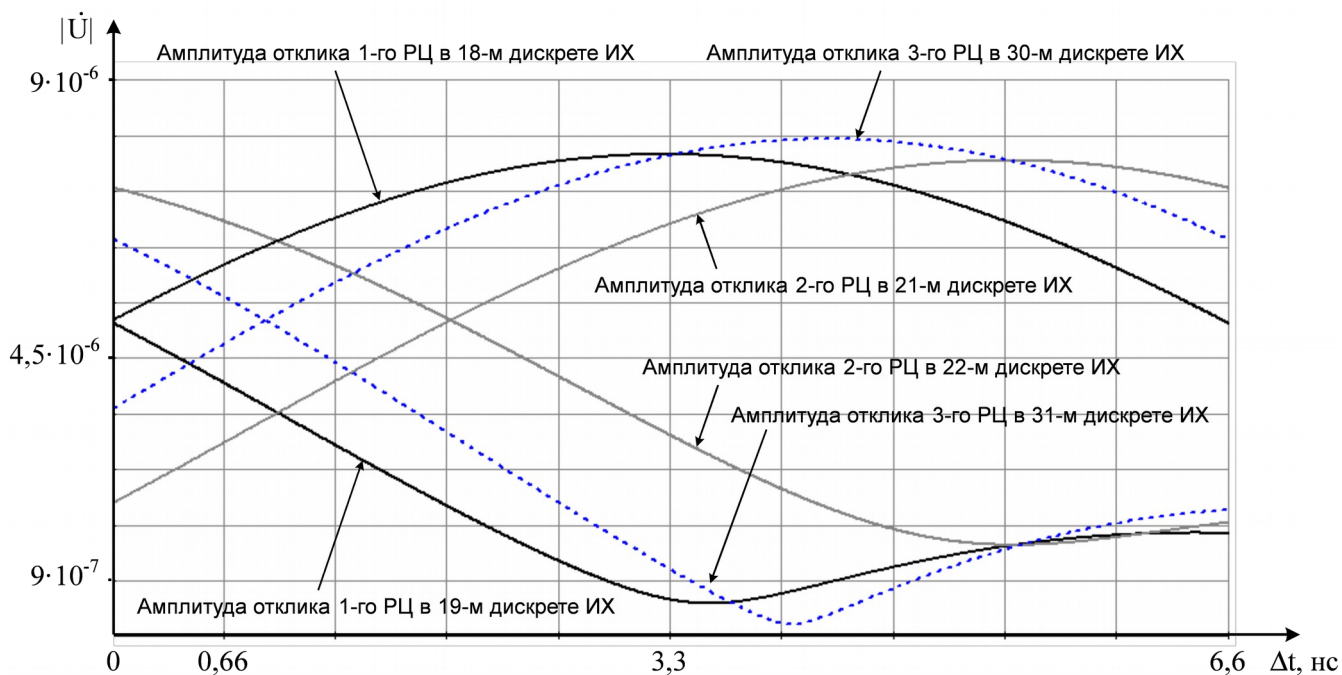


Рис. 11. Изменение амплитуд откликов РЦ в зависимости

от их удаленности от исходной точки при радиальном перемещении ВО

Анализ рисунка 11 позволяет сделать вывод о том, что при перемещении ВО на расстояние, соответствующее интервалу между отсчетами ИХ, отклики РЦ плавно «перетекают» из одного дискрета в другой. При этом если истинное положение отклика РЦ окажется строго посередине между дискретами, амплитуда воспроизводимых откликов в смежных дискретах ИХ одинакова. Аналогичная зависимость представлена на рисунке 5 для случая изменения временного положения отклика от одного РЦ.

На практике расстояния между РЦ ВО и точкой опорной дальности (моментом опорного времени в ИХ) являются случайными величинами. В связи с этим амплитуды откликов РЦ в ИХ тоже могут изменяться по случайному закону. Амплитуда некоторых из них может характеризовать реальную ЭПР РЦ (при близком расположении отклика от РЦ и отсчета ИХ), а амплитуда других откликов может отражать ЭПР РЦ с

некоторой ошибкой (при $N=64$, $\Delta F=150$ МГц эта ошибка может достигать 40% от амплитуды отклика РЦ, полученной при совпадении его временного положения с отсчетом ИХ). Следовательно, для использования ИХ в задачах идентификации ВО, при обучении системы идентификации (нейронной сети) необходимо учитывать указанные искажения ИХ, вызванные несовпадением откликов РЦ и отсчетов ИХ (эти искажения можно назвать *инструментальными*).

На первый взгляд одним из вариантов устранения искажений ИХ, вызванных несовпадением откликов РЦ с отсчетами ИХ, может быть изменение положения момента опорного времени. Это может привести к увеличению амплитуды некоторых откликов РЦ, но при этом отклики от других РЦ напротив могут сместиться в сторону от ближайших дискретов ИХ, что приведет к снижению их амплитуды и искажению ИХ. Поэтому вариант устранения искажений ИХ за счет смещения момента опорного времени целесообразно считать неэффективным.

Поэтому наиболее действенным способом устранения искажений ИХ, вызванных несовпадением откликов РЦ с отсчетами ИХ, следует признать увеличение разрешающей способности за счет увеличения диапазона перестройки частоты и соответствующего пропорционального увеличения количества импульсов в пачке СПЧ. Если использование большого количества импульсов в пачке в конкретной РЛС окажется нереализуемым, можно прибегнуть к известному способу искусственного формирования отсчетов ЧХ за счет так называемого «дополнения выборки нулями» [15].

Таким образом, можно сформулировать следующие итоговые выводы:

попадание откликов РЦ между дискретами ИХ приводит к ее искажению, выражающемуся в снижении амплитуды откликов, в распределении их амплитуды между

двумя смежными дискретными ИХ и в появлении у откликов паразитных «пьедесталов», распределенных по всей ширине окна просмотра ИХ;

взаимное расположение РЦ оказывает влияние на амплитуды их откликов в ИХ; степень этого влияния снижается с ростом расстояния между РЦ;

для использования ИХ в задачах идентификации ВО при обучении нейросетевых идентификаторов необходимо учитывать возможные искажения ИХ, вызванные несовпадением откликов РЦ и отсчетов ИХ;

в качестве наиболее эффективного способа устранения искажений ИХ, вызванных несовпадением откликов РЦ с отсчетами ИХ, целесообразно рекомендовать увеличение разрешающей способности за счет увеличения диапазона перестройки частоты и пропорционального увеличения количества импульсов в пачке.

Исследования проведены в рамках гранта РФФИ №14-07-00193.

Библиографический список

1. Защита от радиопомех / Под ред. Максимова М. В. - М.: Советское радио, 1976. - 495 с.
2. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. / Под ред. Канащенкова А. И. и Меркулова В. И. - М.: Радиотехника, 2006. Т. 1. - 656 с.
3. Митрофанов Д.Г. Построение двумерного изображения объекта с использованием многочастотного зондирующего сигнала // Измерительная техника. 2001. № 2. С. 57–62.

4. Манукьян А. А. Определение координат локальных неоднородностей на поверхности объекта по многочастотной амплитудно-фазовой диаграмме обратного рассеяния при наличии фазовых искажений // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 1. С. 81–91.

5. Митрофанов Д. Г., Бортовик В. В. Алгоритмы совершенствования метода построения двумерных радиолокационных изображений // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и устройства передачи и обработки информации». Вып. 5. -СПб.: Гидрометеиздат. 2004. С. 105–118.

6. Митрофанов Д. Г., Сафонов А. В. Применение вейвлет-анализа для сохранения структуры дальностных портретов воздушных целей при повышении уровня шумов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. № 9. С. 19–24.

7. Митрофанов Д. Г., Силаев Н. В. Адаптивный многочастотный способ построения радиолокационного изображения флюктуирующей воздушной цели // Радиотехника. 2002. № 1. С. 53–60.

8. Кононов А. Ф. Применение томографических методов для получения радиолокационных изображений объектов с помощью сверхширокополосных сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. №1. С. 35–49.

9. Митрофанов Д. Г. Комплексный адаптивный метод построения радиолокационных изображений в системах управления двойного назначения // Теория и системы управления. 2006. №1. С. 101–118.

10. Майоров Д. А., Митрофанов Д. Г., Заикин Д. Р. Аналитическое описание частотной характеристики объекта локации сигналами с перестройкой частоты // Мето-

ды и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 10. М.: Радиотехника, 2008. С. 154–161.

11. Майоров Д. А., Митрофанов Д. Г. Математическая модель частотной характеристики воздушной цели при перестройке несущей частоты // Приложение к журналу «Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук». Труды 11-й Всероссийской НПК: Актуальные проблемы защиты и безопасности. Санкт-Петербург, Россия, 2008. С. 275–280.

12. Майоров Д. А., Савостьянов В. Ю., Митрофанов Д. Г. Измерение радиальной скорости воздушных объектов в режиме перестройки частоты // Измерительная техника. 2008. № 2. С. 43–47.

13. Майоров Д. А., Савостьянов В. Ю., Митрофанов Д. Г. Применение зондирующих сигналов с перестройкой частоты для оценивания радиальной скорости воздушных объектов методом минимума энтропии // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 9. С. 54–60.

14. Способ измерения радиальной скорости воздушной цели в режиме перестройки частоты от импульса к импульсу. Патент РФ № 2326402 / Савостьянов В. Ю., Майоров Д. А., Митрофанов Д. Г., Прохоркин А. Г. Заявка №2007101537 от 17.01.07. Опубликовано 10.06.08.

15. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. О. И. Хабарова. - М.: Мир, 1990. - 584 с.