

УДК 621.396.96

## МЕЖПАЧЕЧНОЕ КОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ — СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОЦЕНИВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

С.Р. ГЕЙСТЕР, К.Н. ЧУГАЙ

*Военная академия Республики Беларусь  
ВА РБ, Минск, 220057, Беларусь*

*Поступила в редакцию 23 сентября 2003*

В настоящее время оценивание спектральных характеристик сигналов в радиолокаторе осуществляется отдельно в каждой короткой последовательности (пачке) принятых сигналов. Сравнительно малая длительность пачки не позволяет повысить качество решения задач радиолокации. В работе приводятся описание и результаты исследований оригинального способа межпачечного когерентного накопления, обеспечивающего существенное повышение качества оценивания спектральных характеристик сигналов.

*Ключевые слова:* радиолокационный портрет, межпачечное когерентное накопление.

### Введение

При решении задач обнаружения в условиях пассивных помех от объемно распределенных отражателей и распознавания объектов по спектральному радиолокационному портрету (РЛП) разработчики сталкиваются с проблемой увеличения объема информации, извлекаемой из сигнала. Данная проблема является ключевой на пути повышения качества решения отмеченных задач, так как определяет качество формирования спектральных РЛП объектов и помех, используемых при адаптации систем обнаружения и распознавания к условиям наблюдения [1]. В ходе адаптации, основанной на обработке спектрального РЛП, осуществляется оценивание спектральных характеристик мешающих отражений и малоинформативных параметров, характеризующих режим работы двигательной установки объекта. Повышение информативности спектрального РЛП возможно за счет увеличения времени когерентного накопления сигнала. Однако прямое увеличение этого времени вступает в противоречие с требованием периодического обзора углового сектора, в котором решаются задачи обнаружения и сопровождения. Теоретические и экспериментальные исследования позволили найти способ существенного повышения качества формирования спектрального РЛП путем когерентного накопления последовательности из нескольких пачек сигналов, принимаемых РЛС из анализируемого углового направления с периодом обзора сектора или с периодом обращения к объекту  $T_{obr}$ .

Физической основой межпачечного когерентного накопления является оценивание и компенсация межпачечных набегов фаз (фазовая межпачечная демодуляция) принятого сигнала, учитывающих перемещение объектов и мешающих отражателей в интервалах между радиолокационными контактами, а также амплитудная демодуляция межпачечной структуры.

## Временная и спектральная структуры серии пачек радиолокационных сигналов

Временная структура ограниченной последовательности пачек радиоимпульсов (РИ) с прямоугольной огибающей (рис. 1) может быть описана выражением

$$u(t) = \begin{cases} E_0 \sum_{p=1}^{L_p} U_p(t - (p-1)T_{obr}) \exp(i(\omega_0 t + \varphi_{0p})), & 0 \leq t \leq L_p T_{obr} \\ 0, & t < 0, t > L_p T_{obr}, \end{cases} \quad (1)$$

$$U_p(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{L_l} U_0(t - (k-1)T_r) \exp(i\varphi_{0k}), & 0 \leq t \leq L_l T_r \\ 0, & t < 0, L_l T_r < t < T_{obr}, \end{cases}$$

где  $E_0$  — амплитуда РИ;  $U_0(t)$  — закон модуляции одиночного РИ;  $\varphi_{0k}$  — начальная фаза  $k$ -го РИ;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — несущая частота;  $L_l$  — число РИ в пачке;  $U_p(t)$  — комплексный закон модуляции пачки;  $\varphi_{0p}$  — случайная начальная фаза  $p$ -й пачки;  $L_p$  — число когерентно накапливаемых пачек.

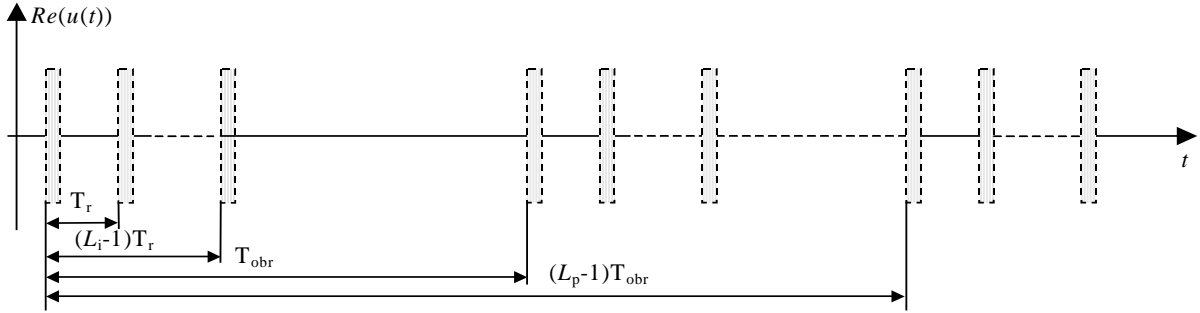


Рис. 1 Квадратурная составляющая серии пачек радиоимпульсов

В соответствии с [2] корреляционная функция серии пачек РИ имеет вид

$$c(\tau) = \frac{1}{L_p L_l T_0} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u(t - \tau) dt = 2P_0 \sum_{l=-L_p+1}^{L_p-1} r_{L_p}^{|l|} C_p(\tau - l T_{obr}) \exp(i\omega_0 \tau), \quad (2)$$

где  $C_p(\tau) = \sum_{h=-L_l+1}^{L_l-1} r_{L_l}^{|h|} C_0(\tau - h T_r)$  — корреляционная функция закона модуляции пачки РИ;

$C_0(\tau)$  — корреляционная функция закона модуляции одиночного РИ;  $r_{L_p}^{|l|}$  — коэффициент, характеризующий межпачечную корреляцию сигналов;  $r_{L_l}^{|h|}$  — коэффициент, характеризующий междупериодную (внутрипачечную) корреляцию сигналов;  $P_0$  — мощность сигнала.

Соответствующее выражение для энергетического спектра серии пачек РИ имеет вид

$$\begin{aligned} s(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau) \exp(i\omega \tau) d\tau = 2P_0 \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_{L_p}^{|l|} \int_{-\infty}^{\infty} C_p(\tau - l T_{obr}) \exp(-i(\omega - \omega_0) \tau) d\tau = \\ &= 2P_0 \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_{L_p}^{|l|} \sum_{h=-\infty}^{\infty} r_{L_l}^{|h|} \int_{-\infty}^{\infty} C_0(\tau - h T_r - l T_{obr}) \exp(-i(\omega - \omega_0) \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (3)$$

Проведя в (3) замену переменной интегрирования на величину  $\tau_l = (\tau - hT_r - lT_{obr})$ , получим:

$$s(\omega) = 2P_0 \int_{-\infty}^{\infty} C_0(\tau_l) \exp(-i(\omega - \omega_0)\tau_l) d\tau_l \times \quad (4)$$

$$\times \sum_{l=-\infty}^{\infty} r_{L_p}^{|l|} \exp(-i(\omega - \omega_0)lT_{obr}) \sum_{h=-\infty}^{\infty} r_{L_r}^{|h|} \exp(-i(\omega - \omega_0)hT_r) = s_0(\omega) s_{L_p}(\omega) s_{L_r}(\omega).$$

Из (4) следует, что энергетический спектр последовательности пачек РИ представляет собой произведение трех спектров — спектра  $s_0(\omega)$  одиночного РИ, спектра  $s_{L_r}(\omega)$  последовательности дельта-модулированных РИ, следующих с частотой повторения импульсов в пачке, и спектра  $s_{L_p}(\omega)$  последовательности дельта-модулированных РИ, следующих с частотой следования пачек.

Спектральный РЛП, формируемый в результате межпачечного когерентного накопления, отличается от спектрального РЛП, полученного за такое же время непрерывного наблюдения, наличием множителя  $s_{L_p}(\omega)$ , приводящего к изрезанности основных спектральных компонент в виде боковых лепестков, следующих с частотой повторения пачек. Ключевой процедурой найденного способа межпачечного накопления является адаптивная компенсация межпачечных набегов фаз и устранение межпачечной амплитудной модуляции (амплитудно-фазовая межпачечная демодуляция). Важность этой процедуры покажем на примере межпачечного накопления без компенсации этих набегов.

### Исследования межпачечного накопления без компенсации межпачечных набегов фаз

Рассмотрим серию пачек комплексных видеосигналов, представляющих аддитивную смесь двух детерминированных сигналов на разных частотах. Причем для первого сигнала частота и амплитуда имели значения:  $F_1 = 930$  Гц и  $E_1 = 1$  В, а для второго сигнала —  $F_2 = 1430$  Гц и  $E_2 = 0,1$  В. Кроме того, количество импульсов в пачке составляло  $L_r = 16$ , количество пачек —  $L_p = 5$ , частота следования импульсов в пачке  $F_r = 4$  кГц (частота дискретизации сигнала), межпачечный интервал  $T_{obr} = 40 \cdot 10^{-3}$  с. Далее приведены спектральные РЛП описанного сигнала, полученные путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) от одиночной пачки (рис. 2), полной совокупности пачек без компенсации набегов фазы и положения пачек (рис. 3) и совокупности состыкованных по времени ("склеенных") пачек после компенсации межпачечных набегов фазы (рис. 5).

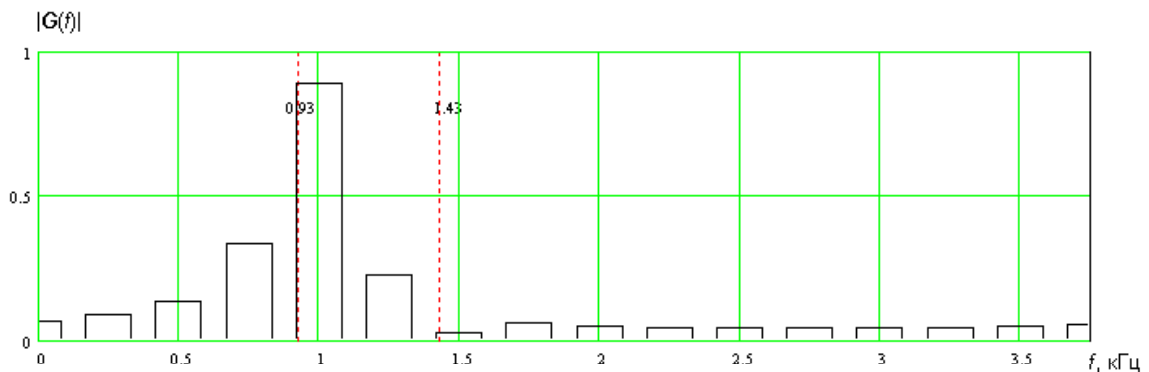


Рис. 2. Спектральные РЛП сигнала, полученные путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) от одиночной пачки

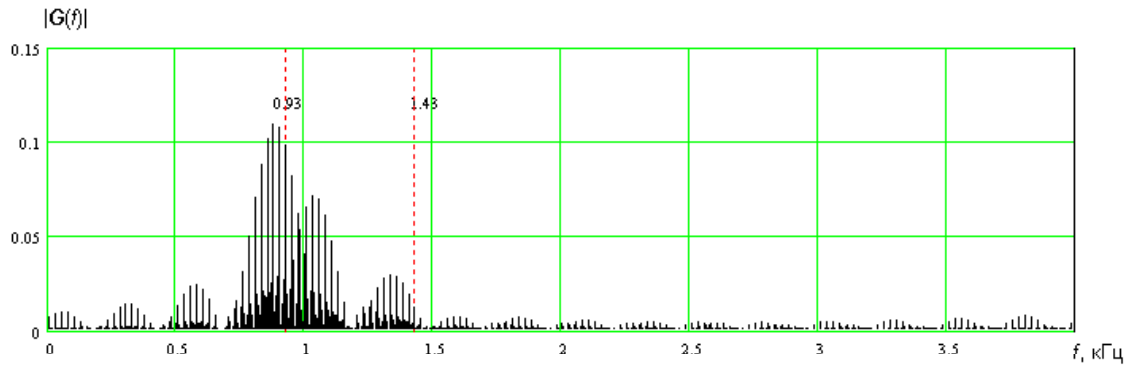


Рис. 3. Спектральные РЛП сигнала, полученные путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) от полной совокупности пачек без компенсации набегов фазы и положения пачек

### Структура устройства межпачечного когерентного накопления с адаптивной компенсацией межпачечных набегов фаз

Для снижения уровня паразитных спектральных компонент (рис.3) и повышения точности оценивания спектральных характеристик предлагаемый способ, реализуемый в устройстве межпачечного когерентного накопления (рис. 4), предполагает адаптивную амплитудно-фазовую демодуляцию межпачечной структуры принятого сигнала.

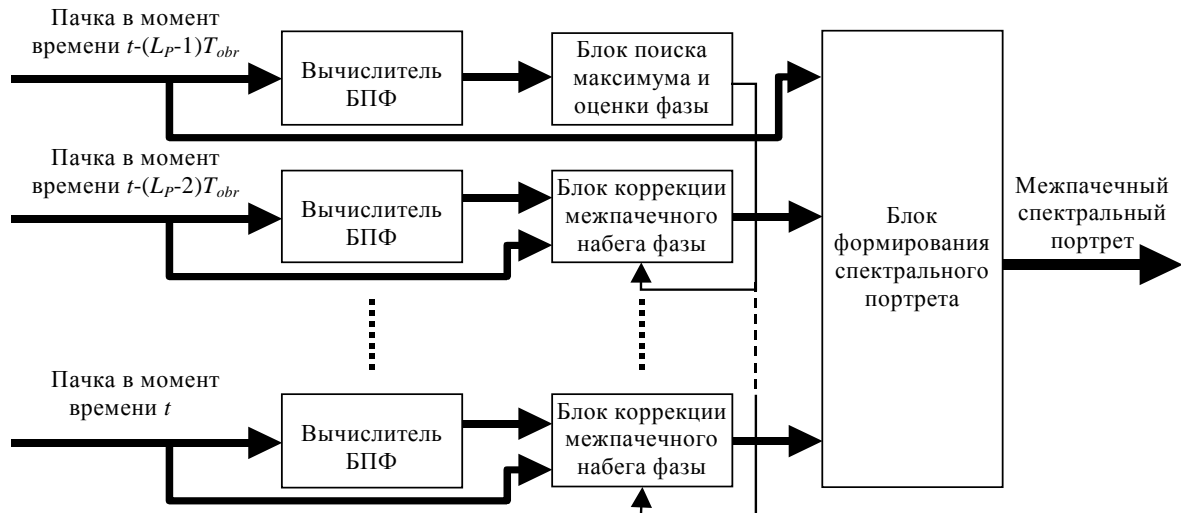


Рис. 4. Структурная схема устройства межпачечного когерентного накопления

При этом последовательно выполняются следующие операции: оценивание частоты  $f_d$  и фазы  $\psi_0$  сигнала в фильтре БПФ с максимальной компонентой, полученного для первой пачки последовательности; оценивание фаз  $\psi_l, l = \overline{1 \dots (L_p - 1)}$  в одноименных фильтрах БПФ для всех последующих  $(L_p - 1)$  пачек; формирование корректирующих множителей  $\exp(-i(\psi_l - \psi_0 + 2\pi l f_d T_{obr}))$  для всех  $(L_p - 1)$  пачек и умножение на них сигналов в соответствующих пачках; соединение на временной оси ("склеивание") скорректированных по начальным фазам пачек с образованием единой пачки длительностью  $L_p L_l T_r$ ; формирование дискретного преобразования Фурье от склеенной пачки, то есть формирование более информативного спектрального РЛП (рис. 5).

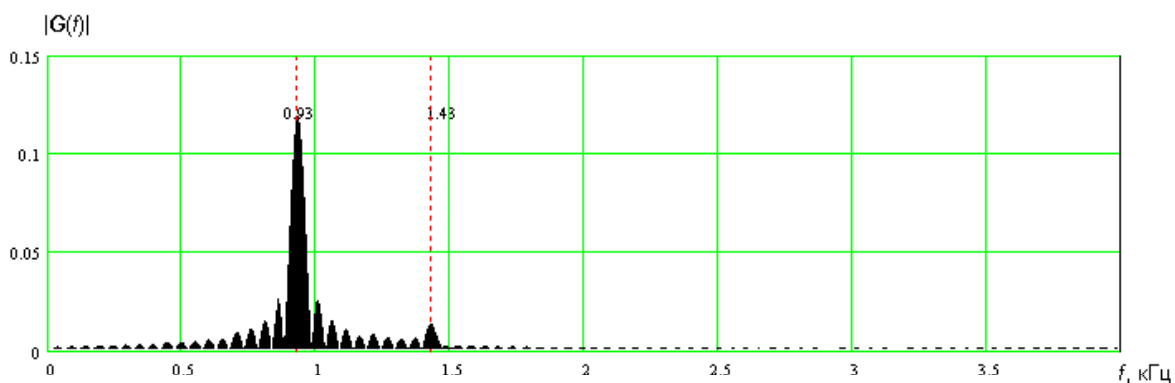


Рис. 5. Спектральные РПП сигнала, полученные путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) от совокупности состыкованных по времени ("склеенных") пачек после компенсации межпачечных набегов фазы

### Заключение

Рассмотренный способ адаптивного межпачечного когерентного накопления позволяет увеличить информативность спектрального РПП и, соответственно, улучшить качество распознавания, а также повысить эффективность обнаружения объектов на фоне мешающих отражений за счет повышения точности оценивания характеристик помех и повышения отношения сигнал/помеха (помеха/фон) в пропорции с количеством когерентно накапливаемых пачек.

## INTERPACKET COHERENT ACCUMULATION AS A METHOD OF RAISING THE QUALITY OF ESTIMATION OF RADAR SIGNALS SPECTRAL CHARACTERISTICS

S.R. GEYSTER, K.N. CHUGAY

### Abstract

At present the estimation of radar signals spectral characteristics is realized separately in each short succession (packet) of received signals. Comparatively small packet duration does not allow to rise the quality of radar problems solution. The work contains the description and the results of the research of an original method of interpacket coherent accumulation, providing significant rise of estimation quality of spectral characteristics of signals.

### Литература

1. *Гейстер С.Р.* Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам. Мн., 2000.
2. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. М., 1983.