

ВЛИЯНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА

С. А. Габец, С. Ю. Седышев

Военная академия Республики Беларусь, Минск, e-mail: s_a_box@mail.ru

В настоящее время когерентное накопление реализуют в радиолокационных станциях с помощью набора аналоговых или цифровых фильтров с фиксированными настройками их полосы пропускания. Максимальная эффективность таких устройств когерентного накопления достигается только в случае совпадения полосы фильтра с шириной зубца энергетического спектра последовательности отраженных сигналов [1, 2, 3]. В свою очередь, ширина зубца энергетического спектра пачки отраженных сигналов определяется временем наблюдения цели и шириной спектра его междупериодных флуктуаций.

Ширина спектра междупериодных флуктуаций отраженного сигнала (или время корреляции междупериодных флуктуаций) зависит от множества факторов, основными из которых являются тип, курс цели и погодные условия [1, 2]. Так как настройки устройства когерентного накопления фиксированы, потенциальная эффективность в общем случае не достигается.

Рассмотрим корреляционные свойства последовательности отраженных сигналов от различных целей при различных погодных условиях с помощью программы BACK SCATTERING SIMULATION (BSS) [4], которая позволяет получить комплексные междупериодные значения амплитуд флуктуирующего сигнала с учетом характеристик радиолокационной станции, параметров движения цели и погодных условий. Интерфейс взаимодействия программы BSS с пользователем представлен на рисунке 1.

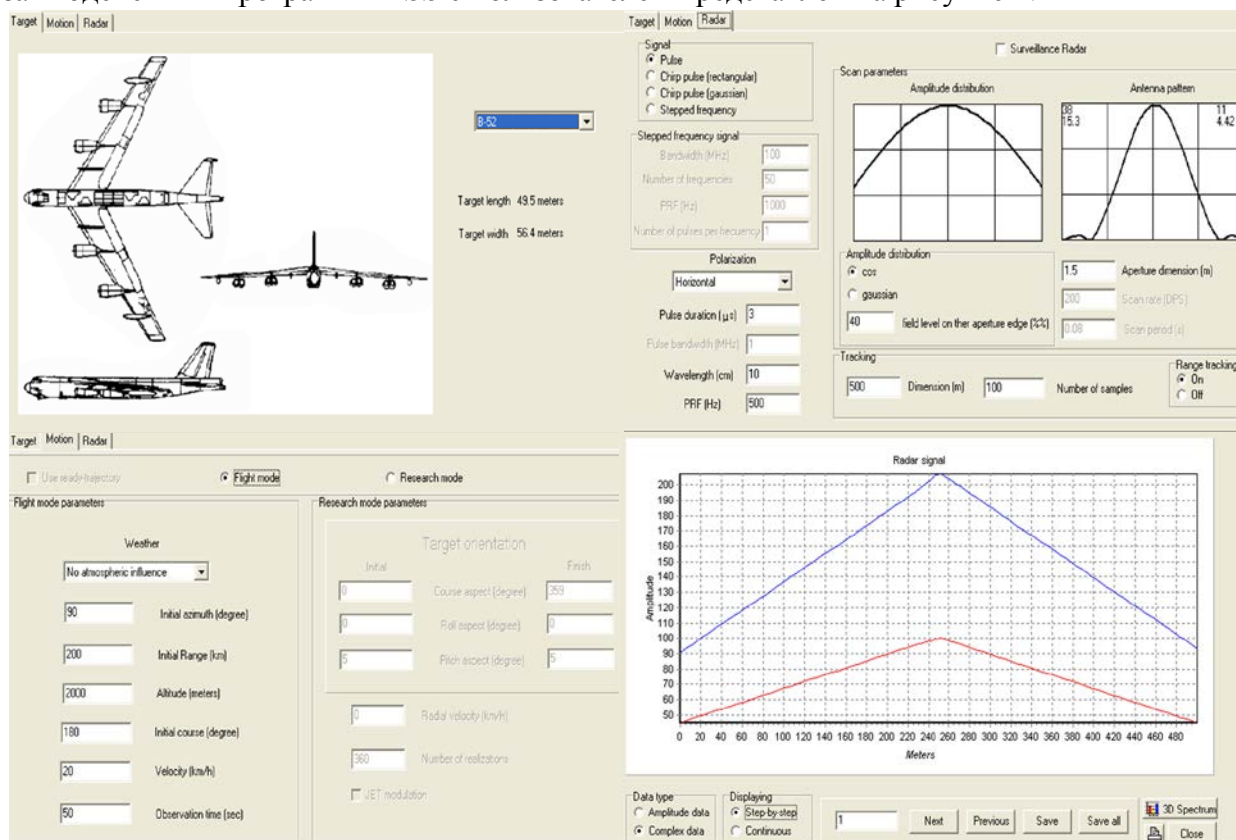


Рисунок 1 – Изображение интерфейса программы BACK SCATTERING SIMULATION

Для оценки междупериодных корреляционных свойств отраженного сигнала путем моделирования для каждого типа воздушного объекта генерировалось 25.000 комплексных амплитуд. Моделирование проводилось для радиолокатора со следующими

характеристиками: частота зондирования 500 Гц, длительность зондирующего сигнала 3 мкс, длина волны 10 см.

Каждый массив полученных значений рассматривался как стационарный случайный процесс [5, 6]. С учетом стационарности этот массив разделялся на 250 интервалов по 100 значений. На каждом интервале f_m осуществлялись оценки энергетического спектра флуктуаций пачки отраженных сигналов:

$$\hat{S}_n^k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} f_m^k e^{-j2\pi \frac{mn}{N}},$$

где k – номер интервала;

N – число отсчетов энергетического спектра флуктуаций.

Оценка энергетического спектра междупериодных флуктуаций определяется как среднее арифметическое значение энергетических спектров всех интервалов:

$$\hat{S} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \hat{S}^k,$$

где \hat{S}^k – мгновенный энергетический спектр флуктуаций отраженного сигнала.

На рисунке 2, а показаны энергетические спектры флуктуаций отраженного сигнала от различных типов целей при нормальных погодных условиях (спокойная атмосфера, среднеквадратическое отклонение скорости ветра менее 0,5 м/с [4]).

Найдем оценочную корреляционную функцию флуктуаций отраженного сигнала:

$$\hat{R}_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \hat{S}_m^k e^{j2\pi \frac{mn}{N}}.$$

На рисунке 3, а приведены результаты расчетов корреляционных функций флуктуаций отраженных сигналов для различных типов целей при нормальных погодных условиях.

С помощью представленной выше методики так же были получены характеристики междупериодных флуктуаций отраженного сигнала в турбулентных погодных условиях (грозовая турбулентность, среднеквадратическое отклонение скорости ветра более 4 м/с [4]), рисунки 2, б и 3, б.

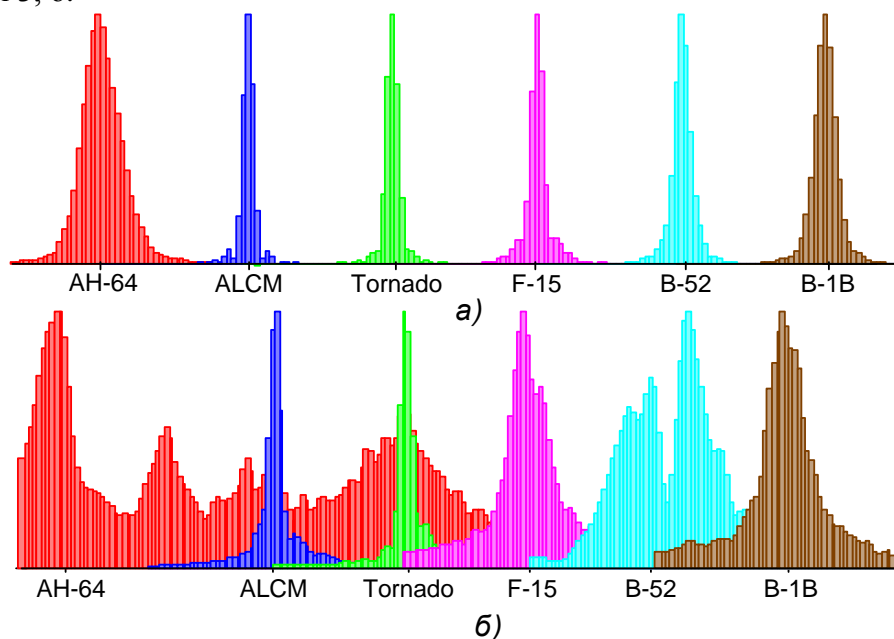
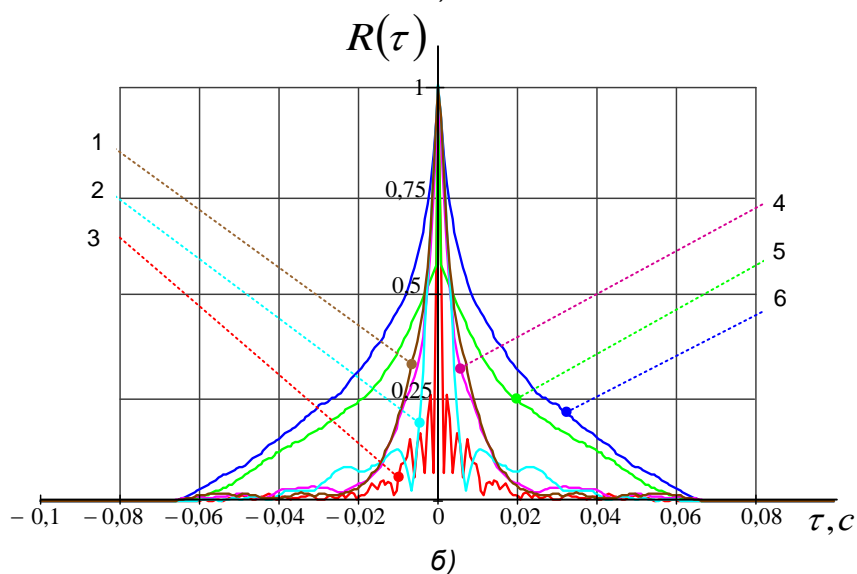
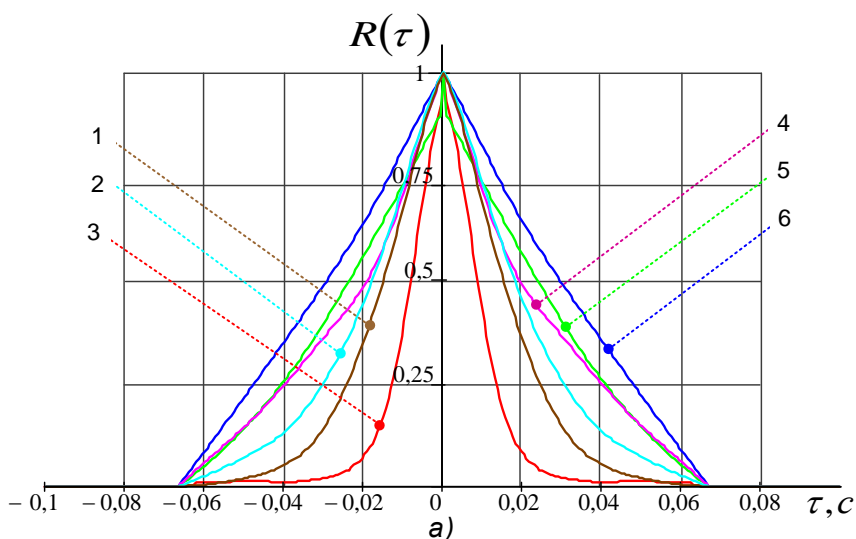


Рисунок 4 – Энергетические спектры междупериодных флуктуаций отраженного сигнала от различных целей: а) при нормальных погодных условиях; б) для турбулентной атмосферы



1 – крылатая ракета ALCM; 2 – тактический истребитель Tornado;
 3 – тактический истребитель F-15; 4 – стратегический бомбардировщик B-1B;
 5 – стратегический бомбардировщик B-52; 6 – вертолет AH-64

Рисунок 5 – Корреляционные функции между периодными флуктуациями отраженного сигнала от различных целей: а) при нормальных погодных условиях; б) для турбулентной атмосферы

Полуширина основного лепестка корреляционной функции определяет время корреляции как основание прямоугольника, площадь которого при одинаковой высоте равна половине площади основного лепестка:

$$\tau_0 = \int_0^{+\infty} R(\tau) dt.$$

В данном случае полученные корреляционные функции являются дискретными, выражение (4) приобретает вид, представленный формулой

$$\tau_c = \sum_{k=0}^{N-1} R_{\Pi}(k).$$

При аппроксимации корреляционной функции флуктуаций отраженного сигнала экспоненциальной огибающей коэффициент корреляции определяется выражением

$$r_c = e^{-T_{\Pi}/\tau_c},$$

где T_{Π} – период повторения зондирующего сигнала.

Используя приведенную выше методику расчета необходимых корреляционных характеристик флуктуаций отраженного сигнала, получим данные для различных типов целей, приведенные в таблице 1.

Действительно, из таблицы 1 видно, что корреляционные характеристики последовательности отраженных сигналов значительно отличаются друг от друга в зависимости от типа цели и погодных условий. Из-за этих различий максимальной эффективности устройство когерентного накопления может достичь только в частном случае. При неоптимальном сочетании времен когерентного и некогерентного накопления характеристики обнаружения ухудшаются, как показано на рисунке 6.

На рисунке 6 приведены зависимости вероятностей правильного обнаружения цели D от отношения мощности сигнала P_c к мощности шума $P_{ш}$ после когерентного накопления ($\rho = P_c \nu_{II} / P_{ш}$, где ν_{II} – эффективность когерентного накопителя) [2].

Характеристики обнаружения моделировались согласно методике, приведенной в [2, 3], при накоплении 25 импульсов с частотой повторения 500 Гц и при условной вероятности ложных тревог $F=10^{-5}$. Время наблюдения пачки T_H в данном случае составила 0,05 с (пачка из 25 импульсов с периодом следования 2 мс). Времена когерентного и некогерентного накопления при построении характеристик обнаружения были фиксированы: $T_{кн} = 0,018$, $T_{нн} = 0,032$.

Таблица 1 – Корреляционные характеристики между периодных флуктуаций отраженного сигнала

Результаты расчета корреляционных характеристик флуктуаций отраженного сигнала						
Тип цели	Ширина основного лепестка ЭС (Δf_c), Гц		Коэффициент корреляции (r_c)		Время корреляции (τ_c), с	
	норм. атм.	турбул. атм.	норм. атм.	турбул. атм.	норм. атм.	турбул. атм.
АН-64	17,40	52,45	0,933	0,811	0,029	0,009
ALCM	6,45	8,26	0,975	0,967	0,078	0,061
Tornado	6,70	17,33	0,974	0,933	0,075	0,029
F-15	9,58	16,82	0,962	0,935	0,052	0,029
B-52	7,84	28,56	0,969	0,892	0,064	0,017
B-1B	9,58	16,82	0,962	0,935	0,052	0,029

Время между периодной корреляции сигнала с учетом ограниченного числа импульсов рассчитывалось с помощью выражения

$$\tau_{Lc} = -\frac{T_H}{\ln(r_c \cdot r_L)},$$

где r_L – коэффициент между периодной корреляции флуктуации, учитывающий ограниченное число импульсов пачки, определялся выражением

$$r_L = e^{-2/L},$$

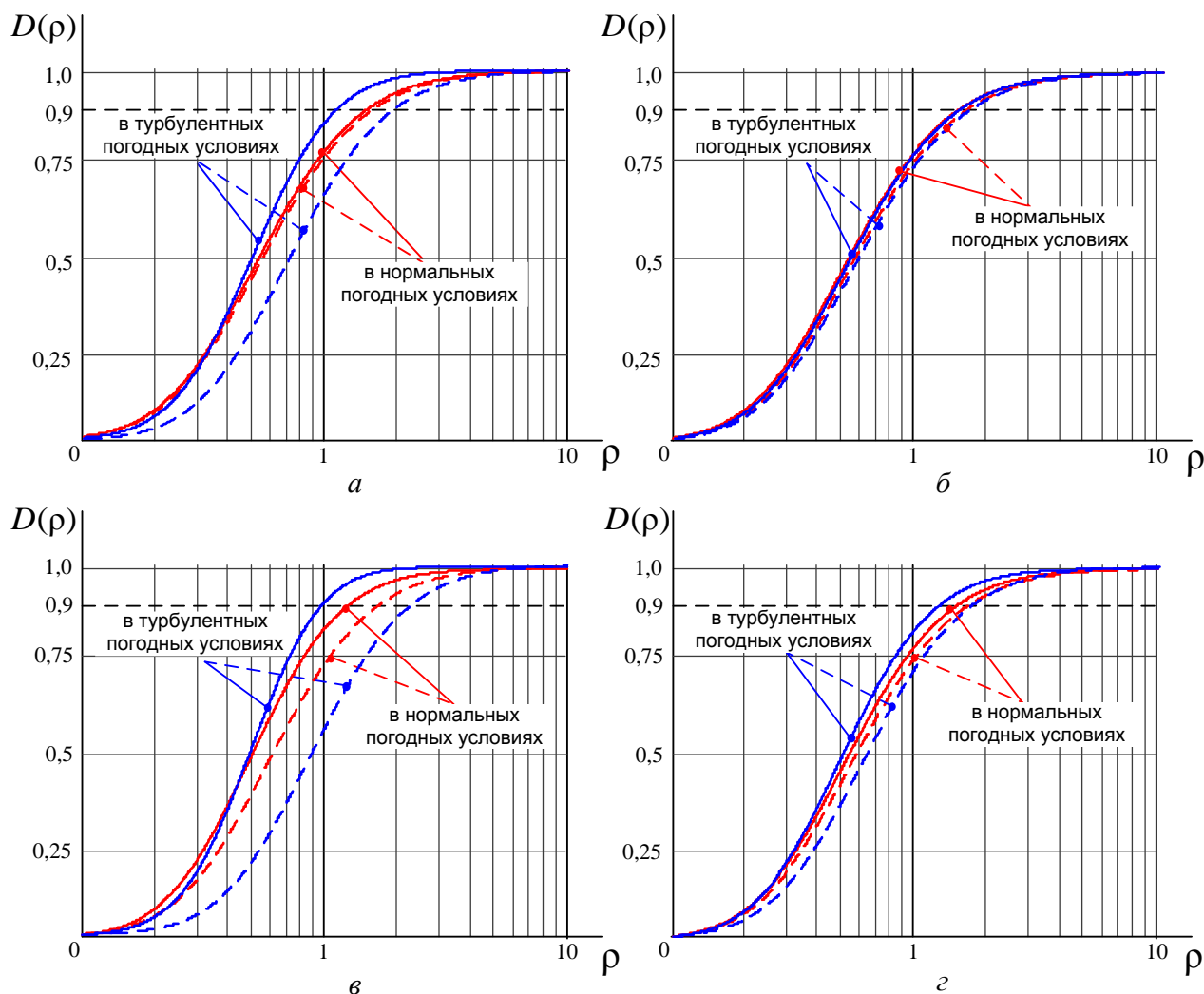
где L – число импульсов пачки (при $L = 25$, $r_L = 0,923$). Результаты расчета времени между периодной корреляции пачки отраженных сигналов из 25 импульсов для различных типов целей и погодных условий приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Корреляционные характеристики пачки отраженных сигналов с учетом ограниченного числа импульсов

Тип цели:		АН-64	ALCM	Tornado	F-15	B-52	B-1B
Нормальные атмосферные условия	$r_c \cdot r_L$	0,861	0,901	0,899	0,888	0,894	0,888
	τ_{Lc} , с	0,013	0,019	0,019	0,017	0,018	0,017
Турбулентные атмосферные условия	$r_c \cdot r_L$	0,749	0,893	0,861	0,863	0,823	0,863
	τ_{Lc} , с	0,007	0,018	0,013	0,014	0,010	0,014

Наилучших характеристик обнаружитель достигает при согласовании времени когерентного накопления с временем между периодной корреляции сигнала ($T_{кн} = \tau_{Lc}$) и условия использования оставшегося времени наблюдения для некогерентного накопления ($T_{нн} = T_n - T_{кн}$). На рисунке 6 эти характеристики показаны сплошными линиями.

В случае фиксированного времени когерентного накопления характеристики обнаружения могут ухудшиться (штриховые линии на рисунке 6), так как для определенных типов целей сочетание времени когерентного и некогерентного накопления не является оптимальным.



a – бомбардировщик В-52; $б$ – крылатая ракета АЛКМ; $в$ – вертолет АН-64; $г$ – тактический истребитель F-15

Рисунок 6 – Характеристики обнаружения при оптимальном и неоптимальном сочетании времени когерентного и некогерентного накопления в нормальных и турбулентных погодных условиях

Таким образом, знание коэффициента между периодной корреляции отраженного сигнала позволяет оптимизировать между периодную обработку и параметры устройства принятия решений об обнаружении сигнала. Из рисунка 6 следует, что улучшение характеристик обнаружения позволяет повысить дальность обнаружения радиолокатора на 1,9–14,6 % для бомбардировщика, на 0,7–2,1 % для крылатой ракеты, на 8–24,5 % для вертолета и на 2,7–7,8 % для тактического истребителя в нормальных и турбулентных погодных условиях соответственно.

Список литературы

1. Горшков, С. А. Основы радиолокации: конспект лекций / С. А. Горшков, В. В. Латушкин, С. Ю. Седышев. – Минск: ВА РБ, 2003. – Ч. 1. – 127 с.

2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справ. / Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Латушкин, В. В. Основы радиолокации. Модели сигналов и помех: конспект лекций / В. В. Латушкин, С. А. Горшков, С. Ю. Седышев. – Минск: ВА РБ, 2005. – Ч. 2. – 172 с.
4. Shirman, Y. D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Y. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. Yu. Sedyshev. – Boston – London: Artech House, Inc., 2002. – 294 p.
5. Быков, В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 330 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учеб. для студ. вузов / Е. С. Вентцель. – 10-е изд., стер. – М.: Академия, 2005. – 576 с.