

УДК 621.396.26

Ю.Н. КОРЖ, А.И. ТЫРТЫШНИКОВ, А.М. МАРТЫНЕНКО

Полтавский Национальный Технический Университет, Украина

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФИЛЬТРА СДЦ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ФЛЮКТУИРУЮЩЕЙ ЦЕЛИ

В статье проведена сравнительная оценка параметра обнаружения фильтра СДЦ для различных моделей флюктуирующей цели. Показано, что применение для расчётов модели цели в виде совокупности механических осцилляторов с различными собственными частотами колебаний приводит к существенным отличиям в оценке эффективности системы СДЦ для нефлюктуирующей цели. В свою очередь, в рамках модели осцилляторов, подход к расчёту корреляционной функции и спектральной плотности мощности амплитудных флюктуаций эхо-сигнала цели может быть различным.

**Ключевые слова:** блестящая точка, осциллятор, плотность распределения вероятности, корреляционная функция.

### Введение

Модель летательного аппарата (ЛА), как объекта радиолокации, согласно общепринятым представлениям [1], представляется в виде совокупности блестящих точек (БТ).

Учитывая экспериментальные данные о спектре амплитудных флюктуаций сигнала отражённого от цели [2], можно представить БТ в виде механического осциллятора, колеблющегося за счёт вибраций ЛА с присущей ему частотой  $F_i$  и амплитудой  $A_i$ .

В силу конструктивных особенностей ЛА (требование механической устойчивости) частоты колебаний выражаются простыми числами и, в зависимости от размеров ЛА, лежат в диапазоне от единиц до сотен Гц.

Представляет интерес рассмотреть, в рамках данных представлений эффективность системы СДЦ когерентно-импульсных (КИ) РЛС, так как в большинстве работ анализ эффективности СДЦ проводится для не флюктуирующей цели.

Определим для общего случая  $N$  БТ корреляционную функцию и спектр амплитудных флюктуаций эхо-сигнала цели.

Комплексную амплитуду сигнала от  $i$ -й БТ на входе приёмника РЛС можно представить в виде

$$\dot{U}_i(t) = U_i \cdot \exp[-j(2\pi f_i t + \bar{k}_i \bar{r}_i + \varphi_{0i})], \quad (1)$$

где  $U_i$  – амплитуда колебаний сигнала отражённого от  $i$ -й БТ;

$f_i = F_d + F_i$  ( $F_d$  – доплеровская частота ЛА, которую принимаем одинаковой для всех БТ в отсутствии маневрирования ЛА);

$$\bar{k}_i = \frac{2\pi \bar{l}_i}{\lambda_i} = \frac{2\pi \bar{f}_i}{c} \bar{l}_i - \text{волновой вектор} \left( \bar{l}_i = \frac{\bar{k}_i}{|\bar{k}_i|} \right);$$

$\bar{r}_i = \bar{r}_{0i} + \bar{v}_i t$  – радиус-вектор, соединяющий БТ и фокус антенны РЛС,  $\bar{v}_i$  – вектор скорости цели,  $\varphi_{0i}$  – начальная фаза колебаний осциллятора, которую можно считать случайной величиной с равномерной плотностью вероятности на интервале  $0 \div 2\pi$ .

Комплексная амплитуда суммарного колебания в силу принципа суперпозиции представима в виде:

$$\dot{U}_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^N \dot{U}_i(t) \quad (2)$$

Тогда корреляционная функция комплексной амплитуды сигнала

$$R(t) = M[\dot{U}_\Sigma(t) \dot{U}_\Sigma(t+t)] \quad (3)$$

В рамках первой модели, рассматривая механические осцилляторы как непрерывно излучающие электрические диполи, т.е. считая, что частота Доплера  $i$ -й БТ  $f_i = F_d + F_i = \text{const}$ , можно получить аналитические выражения для корреляционной функции и спектральной плотности мощности эхо-сигнала цели.

В предположении независимости колебаний БТ и распределения начальных фаз колебаний  $\bar{k}_i \bar{r}_{0i} + \varphi_{0i}$  по равномерному закону на интервале  $0 \div 2\pi$  корреляционная функция:

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^N U_i^2 \exp\{j(2\pi f_i - \bar{k}_i \bar{v}_i) \tau\} \quad (4)$$

Проецируя  $\bar{v}_i$  на радиус-вектор  $\bar{r}_i$  и, учитывая изотропность среды распространения электромаг-

нитных волн (ЭМВ), преобразуем (4)

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^N U_i^2 \exp\{j(2\pi f_i \pm \frac{2\pi f_i v_{Ri}}{c})\tau\}, \quad (5)$$

где  $v_{Ri}$  – абсолютная величина радиальной скорости  $i$ -й БТ,  $c$  – скорость распространения ЭМВ.

$$\text{Отсюда } R(\tau) = \sum_{i=1}^N U_i^2 \exp\{j2\pi f_i (1 \pm \frac{v_{Ri}}{c})\tau\} \quad (6)$$

Учитывая, что  $\frac{v_{Ri}}{c} \ll 1$  (для существующих скоростей ЛА) окончательно получим:

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^N U_i^2 \exp\{j2\pi f_i \tau\} \quad (7)$$

$$\text{Re}[R(\tau)] = \sum_{i=1}^N U_i^2 \cos(2\pi f_i \tau) \quad (8)$$

Из (7,8) видно, что колебания на входе приёмника представляют собой периодически-стационарный случайный процесс с негауссовой статистикой [3].

$$S(F) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{i=1}^N U_i^2 e^{j2\pi f_i \tau} \right) e^{-j2\pi F \tau} d\tau = \sum_{i=1}^N U_i^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j2\pi(F-f_i)\tau} d\tau = \sum_{i=1}^N U_i^2 \delta(F-f_i) \quad (8)$$

Спектральная плотность мощности амплитудных флюктуаций представляется в виде суммы спектральных составляющих на частотах соответствующих  $f_i$ .

В рамках второй модели необходимо учитывать, что при формировании пачки отражённых эхо-сигналов цели доплеровская частота различна для каждого импульса пачки.

Действительно: координата осциллирующей поверхности вдоль радиус-вектора изменяется по гармоническому закону  $x = A_i \cos(2\pi F_i t + \varphi_{0i})$ , где  $A_i$  – амплитуда колебаний  $i$ -й БТ.

Отсюда мгновенная скорость перемещения поверхности

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = -2\pi F_i A_i \sin(2\pi F_i t + \varphi_{0i}).$$

Соответственно частота Доплера

$$F_{\Delta i} = \frac{2v_R}{\lambda} = -\frac{4\pi F_i A_i}{\lambda} \sin(2\pi F_i t + \varphi_{0i}). \quad (9)$$

Принимая  $4\pi A_i \approx \lambda$ , что может быть справедливо для сантиметрового диапазона волн, получаем из (9)

$$F_{\Delta i} = -F_i \sin(2\pi F_i t + \varphi_{0i}). \quad (10)$$

Далее, можно считать, что для КИ РЛС моменты зондирования  $i$ -й БТ распределены по равномер-

ному закону на интервале  $0 - \frac{1}{F_i}$ . Отсюда плотность вероятности частоты Доплера  $i$ -й БТ запишется в виде [4]:

$$p(F_{\Delta i}) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{F_i^2 - F_{\Delta i}^2}}, & |F_{\Delta i}| < F_i \\ 0, & |F_{\Delta i}| \geq F_i \end{cases}$$

Соответственно плотности вероятности амплитудных флюктуаций отражённого эхо-сигнала, полученные методом имитационного моделирования, для 1, 2, 3 осцилляторов показаны на рис. 1. При количестве осцилляторов более трёх распределение переходит в нормальное.

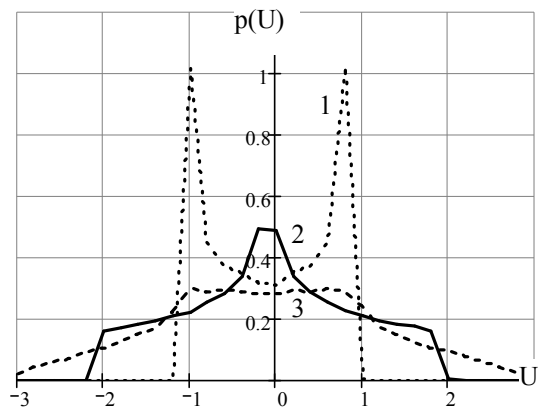


Рис. 1. Плотности вероятности суперпозиции отражённых эхо-сигналов для 1, 2, 3 осциллирующих БТ

Как правило, в экспериментальных спектрограммах выделяются три спектральных составляющих с различиями в амплитудах на 4÷6 db. Естественно предположить, что их частотные и амплитудные отличия обуславливаются ЭПР и собственными частотами механических колебаний характерных частей ЛА: фюзеляжа, плоскостей и хвостового оперения.

На рис. (2,3) приведены зависимости коэффициента корреляции  $r(\tau) = \frac{R(\tau)}{\sum_{i=1}^N U_i^2}$

и нормированной спектральной плотности мощности  $s(F) = S(F)/S(0)$  амплитудных флюктуаций эхо-сигнала цели для двух различных моделей (1 – непрерывно излучающий диполь, 2 – доплеровская частота различна для каждого импульса пачки) в виде трёх БТ, с частотами колебаний  $F_1=7$ ,  $F_2=43$ ,  $F_3=119$  Гц, частота посылок  $F_{\Pi} = 400$  Гц. Амплитуды колебаний составляющих отличаются на 6 db.

Радиальную скорость цели и соответствующую частоту Доплера считаем равными нулю, амплитудную модуляцию отражённого эхо-сигнала ДНА не учитываем.

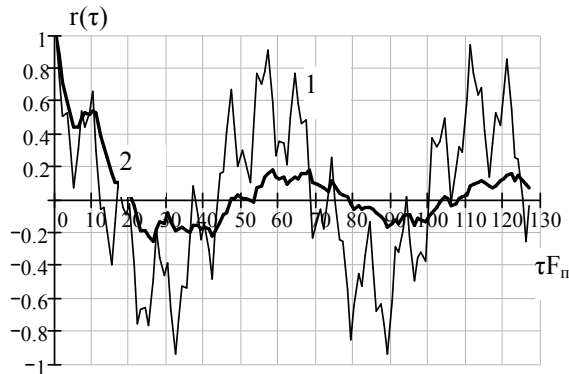


Рис. 2. Коэффициенты корреляции амплитудных флюктуаций эхо-сигнала для первой – 1 и второй – 2 моделей флюктуирующей цели

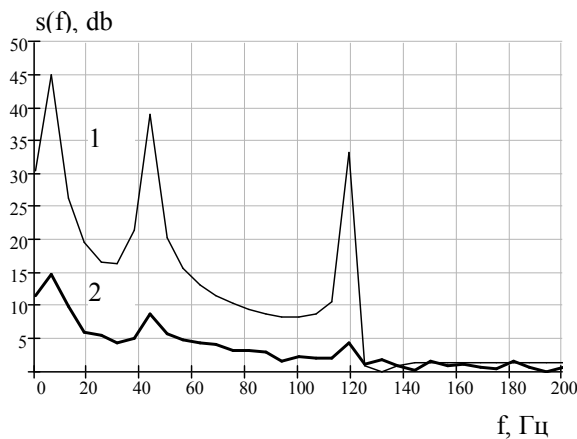


Рис. 3. Нормированная спектральная плотность мощности (64-х точечное ДПФ) амплитудных флюктуаций эхо-сигнала для двух различных моделей цели

При анализе полученных зависимостей можно отметить довольно существенные различия и для корреляционных функций и для спектров двух моделей флюктуирующей цели, что приводит и к различию в показателях качества фильтров СДЦ. На рисунке 4 показаны зависимости параметра обнаружения  $q_{\text{вых}}(F_D)$  от частоты Доплера рассчитанного по формуле

$$q_{\text{вых}}(F_D) = \frac{\bar{\mathbf{W}}^T \mathbf{R}_C \bar{\mathbf{W}}}{\bar{\mathbf{W}}^T \mathbf{R}_I \bar{\mathbf{W}}} \cdot \frac{q}{1+b},$$

где отношение пассивная помеха / шум  $b = P_n/P_{\text{ш}} = 30\text{db}$ ,

отношение сигнал / шум  $q = P_c/P_{\text{ш}} = 20\text{db}$ ,  $\mathbf{R}_c$ ,  $\mathbf{R}_{\text{ш}}$  – корреляционные матрицы сигнала и пассивной помехи / шума соответственно,  $\mathbf{w}$  – весовой вектор цифрового фильтра СДЦ пятого порядка.

Весовой вектор рассчитывался из соотношения  $\bar{\mathbf{w}} = \mathbf{R}_{\text{ПО}}^{-1} \bar{\mathbf{x}}$ , где  $\mathbf{R}_{\text{ПО}}^{-1}$  – обратная корреляционная матрица помехи / шума,  $\bar{\mathbf{x}} = [1, 0, 0, \dots]$  – вектор сигнала, усреднённого по всем доплеровским скоростям в полосе однозначности фильтра.

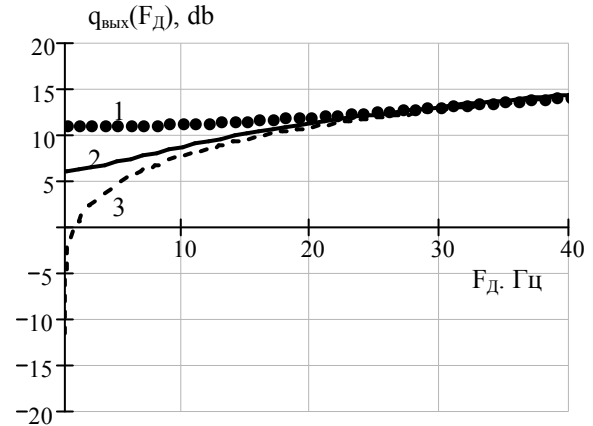


Рис. 4. Отношение сигнал/шум на выходе цифрового фильтра пятого порядка для различных моделей цели (1 – непрерывно излучающий диполь, 2 – доплеровская частота различна для каждого импульса пачки, 3 – нефлюктуирующая цель)

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. Даже при нулевой радиальной скорости цели ( $F_D = 0$ ) для моделей флюктуирующей цели параметр обнаружения  $q_{\text{вых}} \geq 5-12\text{ db}$ , что позволяет отказаться от необходимости вобуляции частоты посылок для устранения эффекта слепых скоростей.

2. При расчёте  $q_{\text{вых}}$  в рамках модели непрерывно излучающих диполей показатели качества системы СДЦ завышаются.

Естественно, что для различных ЛА, набор частот  $F_D$  будет отличаться от рассмотренного выше.

При эволюциях ЛА, из-за изменения ракурса наблюдения, возможно изменение соотношения амплитуд спектральных составляющих, но, вероятно, общие закономерности должны сохраняться. Здесь не учитывались турбинные, пропеллерные эффекты, а также изменения радиальных скоростей БТ при манёврах цели. Они, очевидно, обогатят спектральный состав колебаний, что, учитывая специфику работы КИ РЛС, не ухудшит качество обнаружения целей.

## Литература

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. /Под ред. проф. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Обнаружение радиосигналов / П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др. / Под ред.

А.А. Колосова. – Радио и связь, 1989. – 288 с.

3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд перераб. и доп. / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

4. Бронштейн И.Л. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е издание, исправленное / И.Л. Бронштейн. -М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит, 1986. – 544 с.

Поступила в редакцию 08.02.2009

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф. Н.В. Галай, Полтавский государственный технический университет, Полтава, Украина.

### ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРУ СРЦ ДЛЯ РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ ФЛУКТУЮЧОЇ ЦІЛІ

*Ю.М. Корж, О.І. Тиртишніков, А.М. Мартиненко*

У статті проведена порівняльна оцінка параметра виявлення фільтру СДЦ для різних моделей флюктуючої цілі. Показано, що застосування для розрахунків моделі цілі у вигляді сукупності механічних осциляторів з різними власними частотами коливань призводить до суттєвих відмінностей в оцінці ефективності системи СРЦ для нефлюктуючої цілі. У свою чергу, в рамках моделі осциляторів, підхід до розрахунку кореляційної функції та спектральної щільності потужності амплітудних флюктуацій ехо-сигналу цілі може бути різним.

**Ключові слова:** блискача крапка, осцилятор, щільність розподілу вірогідності, кореляційна функція.

### THE COMPARATIVE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF FILTER OF SDC FOR THE DIFFERENT MODELS OF FLUCTUATION PURPOSE

*Y.N. Korzh, A.I. Tyrtysnikov, F.M. Martynenko*

In the article the comparative estimation of the parameter of the detection of filter SDC for different models of the fluctuating purpose is carried out. It is shown that the application for the calculations of the model of the purpose in the form of the totality of mechanical oscillators with different natural frequencies of oscillation leads to the essential differences in the estimation of the effectiveness of system SDC for the nonfluctuating purpose. In turn, within the framework the models of oscillators, approach to the calculation of correlation function and spectral power density of the amplitude fluctuations of the echo signal of purpose can be different.

**Key words:** bright point, oscillator, density of probability distribution, correlation function.

**Корж Юрий Николаевич** – старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, e-mail: yurij-pntu@mail.ru.

**Тыртишников Алексей Иванович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной инженерии Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, e-mail: alexey-pntu@mail.ru.

**Мартыненко Анатолий Михайлович** – канд. воен. наук, доцент, проректор по корпоративному управлению Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, e-mail: anatol-pntu@mail.ru.