

## АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ

### Введение

Впервые фазовая манипуляция (*phase shift keying* – *PSK*) была использована в процессе развития программы исследования дальнего космоса. Сейчас схема *PSK* широко используется в радиовещании, а также коммерческих и военных системах связи [1]. Фазоманипулированный сигнал имеет следующий вид:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T_0}} \cos[\omega_0 t + \phi_i(t) + \varphi_0], \quad (1)$$

где  $\sqrt{\frac{2E}{T_0}}$  – амплитудный множитель, определяемый энергией сигнала  $E$  и периодом сигнала  $T_0$ ;  $\omega_0$  – угловая частота несущей;  $\phi_i(t) + \varphi_0$  – фазовая составляющая сигнала, которая включает первый член, зависящий от времени и начальную фазу  $\varphi_0$ . Особую роль у сигналов *PSK* играет составляющая

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M}, \quad (2)$$

которая может принимать  $M$  дискретных значений. Здесь  $i = 1, \dots, M$ , как правило, определяется модулирующей последовательностью.

В [2] рассмотрена методика оценки потенциальных характеристик сигналов с фазовой модуляцией. Вместе с тем, остался ряд вопросов, например анализ влияния точности оценки частоты несущего колебания и начальной фазы сигнала на потенциальные характеристики. Открытым остается вопрос оценки влияния интенсивности мешающего шума на потенциальные характеристики, который имеет место в процессе регистрации и обработки цифровых сигналов.

### Постановка задачи исследования

Известно [3], что особую роль в статистической радиотехнике играет автокорреляционная функция сигнала, поскольку, каждое ее значение можно рассматривать как выход корреляционной схемы оптимальной обработки, когда на нее поступает сигнал без помехи. Одновременно актуальными являются вопросы оценки корреляционной функции сигналов, когда имеются, например, отличия в частоте несущего колебания или начальной фазе. Такой случай может иметь место в схеме квадратурной обработки при демодуляции сигналов с фазовой модуляцией [4].

Полезность оценки автокорреляционной и рассматриваемой в данной статье взаимокорреляционной функций заключается в том, что их анализ позволяет сделать некоторые выводы относительно обнаружения, измерения параметров и различения сигналов в процессе их цифровой обработки. Более того, в [5] доказана связь коэффициента корреляции с отношением сигнал – шум, которая позволяет получить практические рекомендации по совершенствованию систем цифровой обработки сигналов. Таким образом, рассчитанные корреляционные функции могут характеризовать возможности по решению ряда задач статистической радиотехники.

### Методика и результаты исследования

Как известно [6], нормированный коэффициент корреляции рассчитывается с использованием соотношения

$$\rho_{12}(j) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} x_1(k)x_2(k+j)}{\left[ \sum_{k=0}^{N-1} x_1^2(k) \sum_{k=0}^{N-1} x_2^2(k) \right]^{1/2}}, \quad (3)$$

где  $x_1, x_2$  – анализируемые выборки;  $j$  – интервал корреляции,  $N$  – объем анализируемой выборки. При решении рассматриваемой задачи будем формировать выборки  $x_1$  и  $x_2$ , которые отличаются на заданное значение анализируемой величины (например, частоты несущего колебания, начальной фазы, интенсивности мешающего шума). Естественно, что в этом случае максимальное значение нормированного коэффициента корреляции будет меньше единицы (т.е. максимального значения автокорреляционной функции). Полученное значение коэффициента корреляции дает возможность определить отношение сигнал – шум периодического сигнала с использованием соотношения [5]

$$\frac{S}{N}(\text{дБ}) = 10 \times \lg \left| \frac{\rho_{12}(j)}{1 - \rho_{12}(j)} \right| \text{дБ}. \quad (4)$$

В то же время отношение сигнал – шум на выходе корреляционной схемы обработки дает возможность воспользоваться, например, известными характеристиками обнаружения и получить количественные показатели решения задачи обнаружения сигнала.

Может быть поставлена и обратная задача. Используя кривые обнаружения, можно по заданным вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги определить требуемое отношение сигнал – шум [3]. По заданному отношению сигнал – шум с помощью (4) можно рассчитать необходимое значение коэффициента корреляции.

Для проведения расчетов была использована современная специализированная система компьютерной математики MATLAB [7], которая предоставляет пользователю удобные и простые средства, в том числе и для визуального объектно-ориентированного программирования.

Для этого воспользуемся методикой проводимых расчетов, изложенной выше. При этом один из сигналов будет отличаться от другого на заданную величину анализируемого параметра. В качестве оцениваемой величины будем рассматривать потери на выходе корреляционного приемника, которую определим следующим образом:

$$\Delta U = 1 - U_{\text{анал}}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{анал}}$  – выход корреляционного приемника при наличии «возмущающего» влияния анализируемого параметра.

При этом вначале построим зависимость потерь на выходе корреляционного приемника от ошибок в фазовой составляющей сигнала при высокой частоте дискретизации. Полученная зависимость представлена на рис. 1, а.

Анализ представленной зависимости показывает, что ошибки в единицы градусов не приводят к существенным потерям на выходе корреляционного приемника, т.е. по отношению к потенциальным характеристикам. В принципе, при наличии только ошибок в фазовой составляющей, она может быть и до  $15^\circ$ . В этом случае потери на выходе коррелятора будут составлять менее 5%.

На рис. 1, б представлена аналогичная зависимость, рассчитанная для частоты дискретизации  $11025 \text{ Гц}$ . Представленная зависимость носит колебательный характер и незначительно зависит от частоты дискретизации сигнала. В области ошибок фазы, которые интересны для практического использования (менее  $15^\circ$ ), соответствуют тем же значениям, которые представлены на рис. 1, а.

Теперь по аналогичной методике рассчитаем и проанализируем влияние ошибок в частоте несущей составляющей сигнала. При этом вместо круговой частоты  $\omega_0$  будем использовать  $f_{\text{нес}} = 2\pi\omega_0$ , которая измеряется в герцах. Частота несущей у анализируемого сигнала была равна  $1600 \text{ Гц}$ .

Полученные зависимости представлены на рис. 2 (б – частота несущего колебания 1800 Гц). При этом по оси  $X$  отложена ошибка в частоте несущей  $df$ . Как и ранее, потери на выходе коррелятора обозначены символами  $\Delta U$ . Анализ этих зависимостей показывает их незначительную зависимость от частоты несущего колебания. При наличии только ошибок в частоте несущей их значения могут составлять до 100 Гц. Потери на выходе коррелятора при наличии таких ошибок составят менее 5%. При этом частота дискретизации слабо влияет на получаемые результаты.

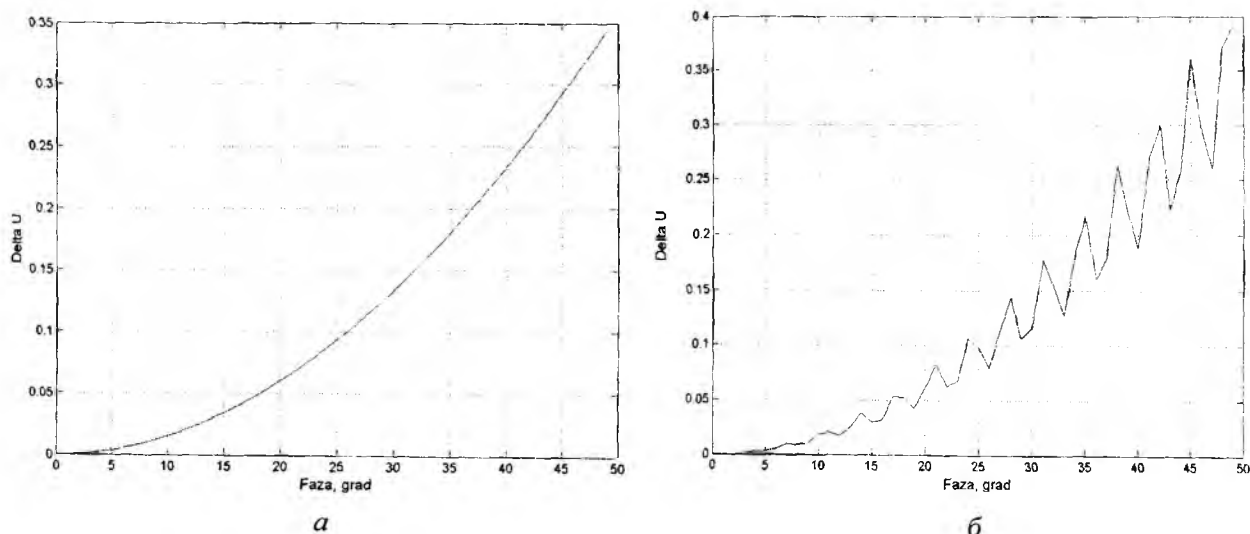


Рис. 1

Реально при обработке временных сигналов будут иметь место ошибки как в определении фазы, так и частоты несущей. Поэтому актуальной задачей является оценка совместного влияния указанных выше параметров на отклик коррелятора.

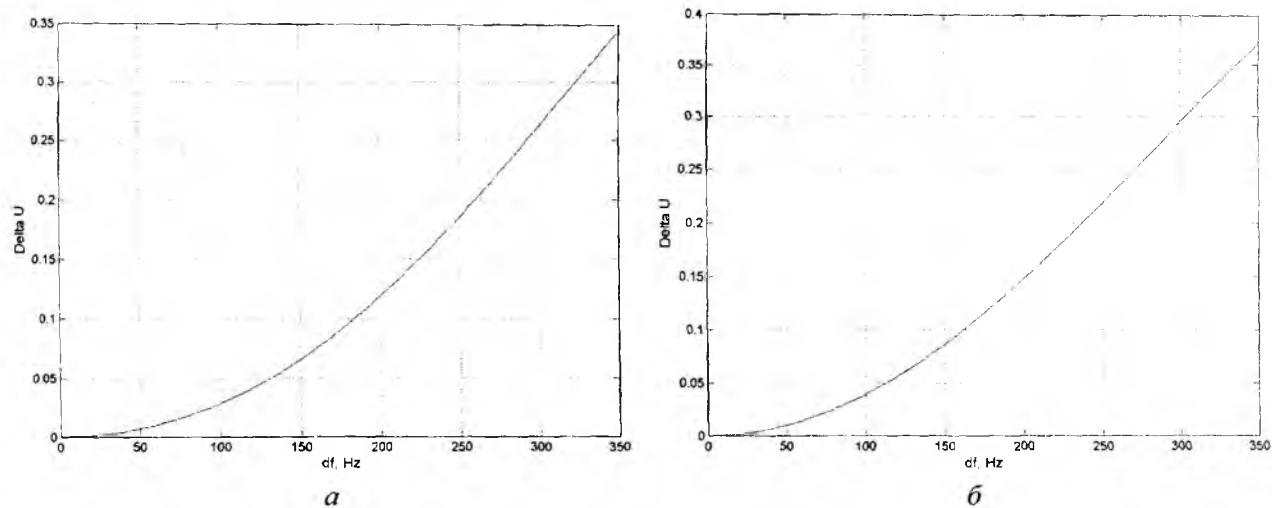


Рис. 2

Диапазон изменения анализируемых параметров (ошибок в фазе и частоте несущего колебания) будет, как и в рассмотренных выше случаях. Полученные зависимости представлены на рис. 3 и 4. Их отличие заключается в диапазоне изменения анализируемых параметров сигнала.

Анализ рис. 3 показывает, что при граничных значениях ошибок потери на выходе коррелятора будут невозможными. О решении каких-либо задач обнаружения, измерения или идентификации сигнала нельзя вести речи [8].

Поэтому при построении зависимости на рис. 4 был изменен диапазон изменения анализируемых ошибок в фазовой и частотной составляющей сигнала. Полученная зависимость дает возможность более точно предъявить требования к точности определения фазовой и частотной составляющей сигнала.

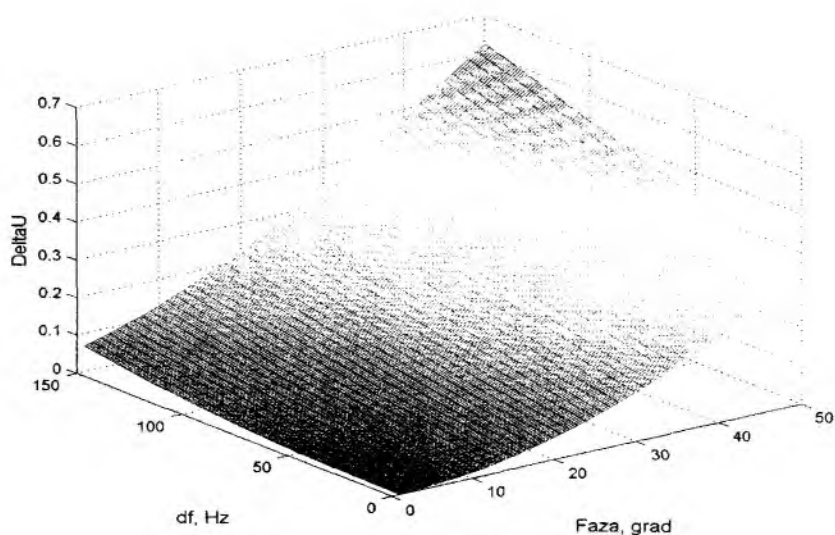


Рис. 3

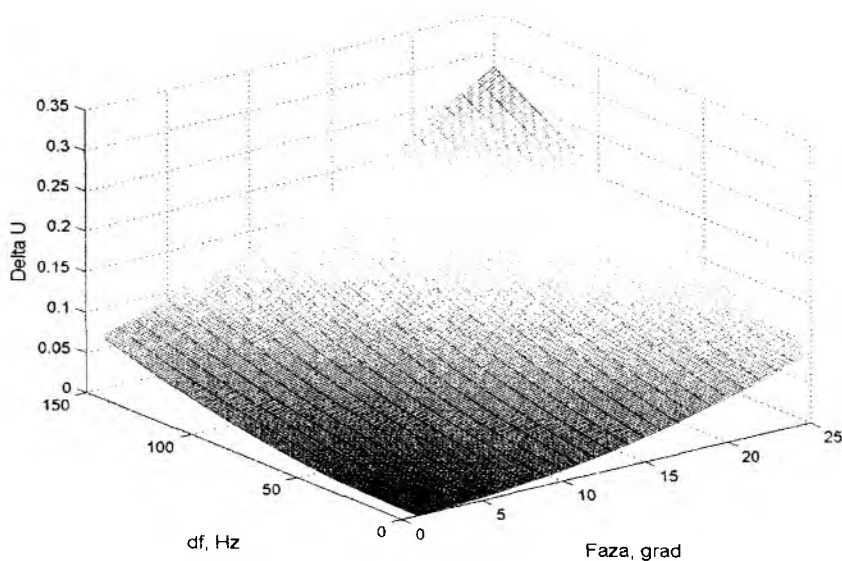


Рис. 4

Анализ показывает, что для качественного решения задач статистической обработки сигналов (потери на выходе коррелятора равны примерно 5%) ошибки в фазовой составляющей должны быть менее  $10^\circ$ , а в частотной составляющей несущего колебания не должны превышать  $120 \text{ Гц}$ . С учетом «правила  $3\sigma$ » [см. 6] среднее квадратическое отклонение указанных ошибок не должно превышать  $3^\circ$  и  $40 \text{ Гц}$  соответственно.

Полученные значения ошибок будут характеризовать потенциальные характеристики. Однако при ведении обработки реальных временных сигналов будет оказывать существенное влияние шумовая составляющая принятого колебания. Поэтому следующая задача связана с учетом влияния гауссовского шума на потенциальные характеристики фазоманипулированных сигналов. Результаты учета влияния шумовой составляющей на потенциальные характеристики фазоманипулированных сигналов представлены на рис. 5 – 7.

Как и следовало ожидать, при снижении отношения сигнал – шум повышаются требования к точности фазовой и частотной составляющей анализируемых сигналов. И наоборот, при высоком отношении сигнал – шум допускаются большие ошибки в анализируемых параметрах. Полученные зависимости позволяют предъявить требования к ошибкам при разных отношениях сигнал – шум.

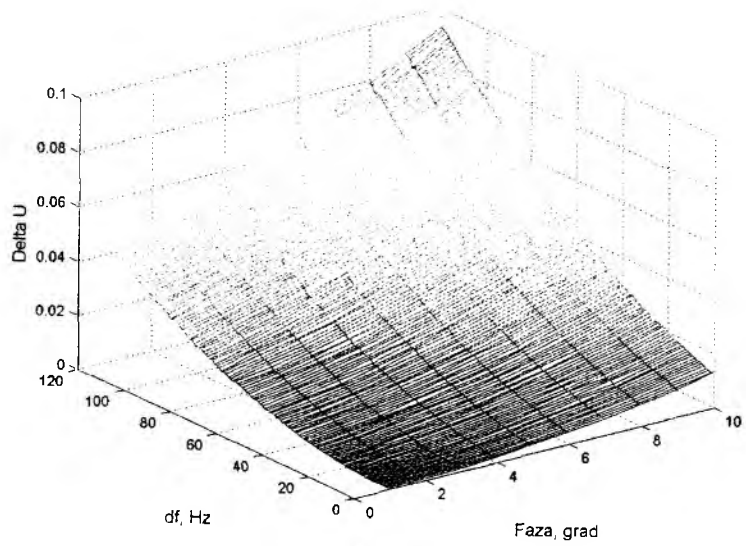


Рис. 5

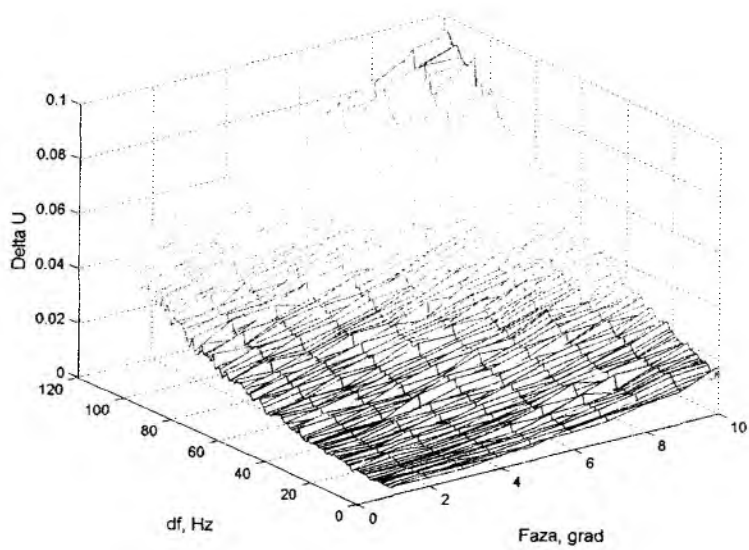


Рис. 6

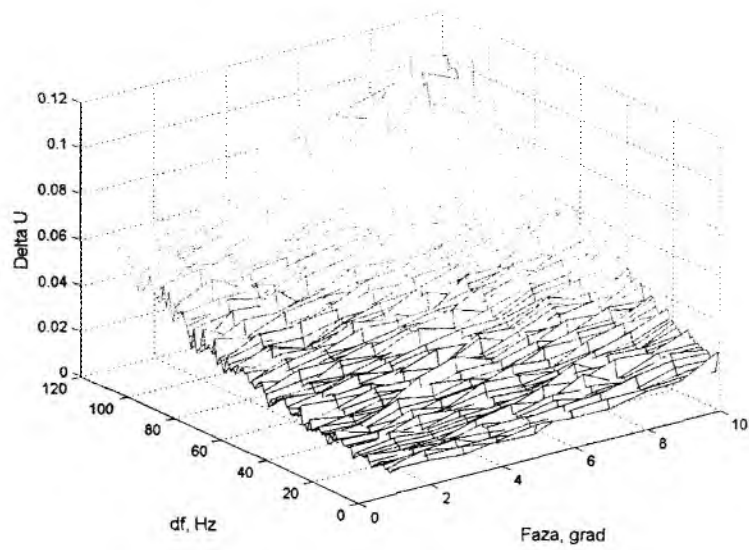


Рис. 7

## Результаты и направления дальнейших исследований

Исследовано совместное влияние ошибок в фазовой составляющей и частоте несущего колебания на потенциальные характеристики фазо-манипулированного сигнала. Установлены пределы изменения среднеквадратических отклонений для анализируемых ошибок. Проанализировано влияние мешающего гауссового шума и построены соответствующие зависимости, которые дают возможность получить оценочные значения допустимых ошибок в фазовой составляющей и частоте несущего колебания.

Дальнейшие исследования целесообразно ориентировать на оценку влияния импульсной характеристики приемного устройства и канала передачи информации на потенциальные характеристики фазо-манипулированного сигнала.

**Список литературы:** 1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Изд. Дом Вильямс, 2004. 1104 с. 2. *Пастушенко Н.С., Пастушенко А.Н.* Оценка потенциальных характеристик фазо-манипулированных сигналов в задачах обнаружения и измерения // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч-тех. сб. 2007. Вып.148. С.238-244. 3. *Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана.* М.: Сов.радио, 1970. 560 с. 4. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с. 5. *Айфичер, Эммануил С.* Цифровая обработка сигналов: практический подход. М.: Изд. Дом Вильямс, 2004. 992 с. 6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1999. 576 с. 7. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 768 с. 8. *Куликов Е.И., Трифионов А.П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов.радио, 1978. 296 с.

*Харьковский национальный  
университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 29.09.2007*