# Метод компенсации узкополосной помехи в сверхширокополосной схеме связи на хаотических радиоимпульсах

Дмитриев А.С., Емельянов Р.Ю., Кузьмин Л.В.

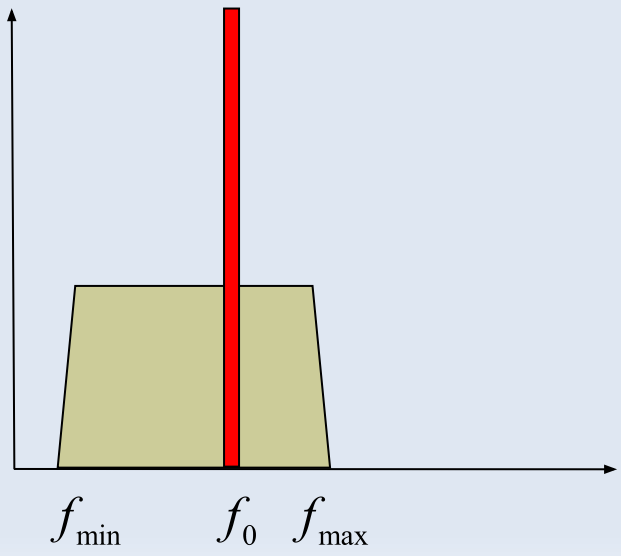
**План презентации**

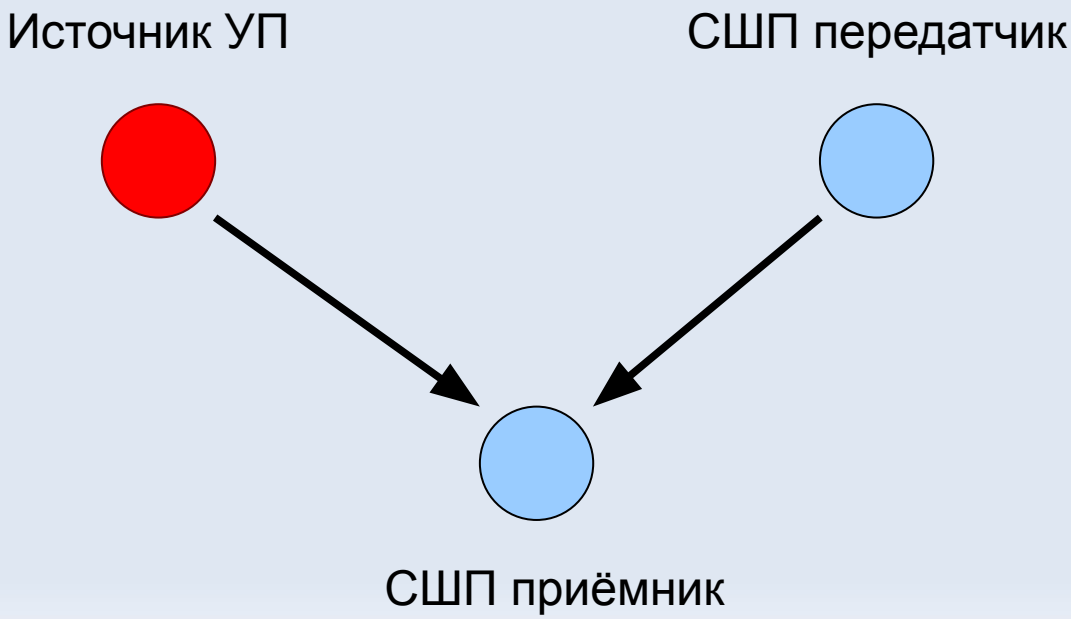
- Введение и постановка задачи
- Существующие методы компенсации узкополосной помехи
- Модель системы связи
- Метод компенсации узкополосной помехи
- Выбор параметров модели
- Исследование эффективности метода
- Заключение

# Введение и постановка задачи

Сверхширокополосные системы связи (СШП) – системы связи, у которых $B_f = \frac{2(f_{\max} - f_{\min})}{(f_{\max} + f_{\min})}$ больше 0.25 и ширина спектра превышает 500 МГц, допустимая спектральная плотность излучения СШП сигнала ограничена сверху.

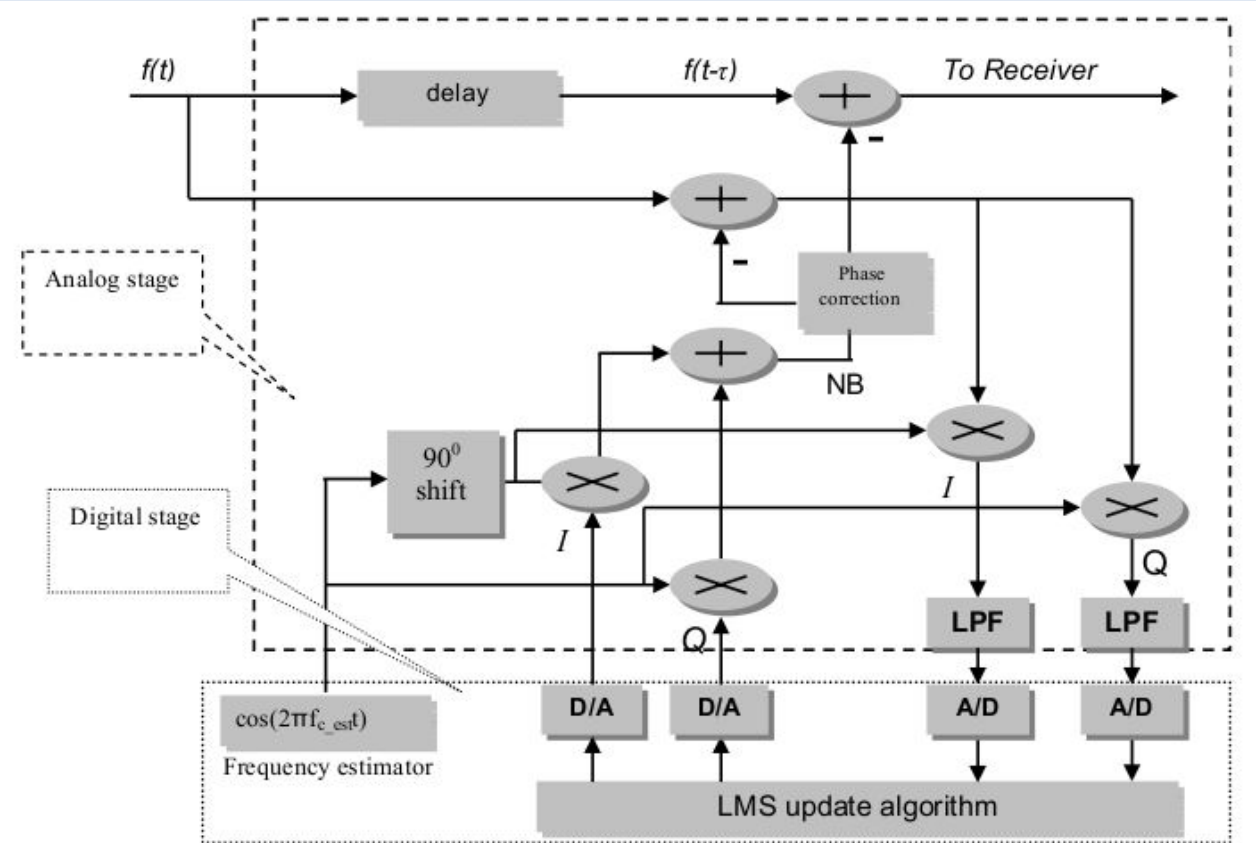
Возможна ситуация появления в рабочем диапазоне СШП системы мощного (по отношению к СШП) узкополосного сигнала (УП).



# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

Метод подавления УП, попадающей в полосу СШП системы, основанный на сложении в приёмнике сигнала приходящего из эфира (суммы СШП сигнала и УП) с узкополосным сигналом, генерируемым в приёмнике в противофазе с УП. Метод требует цифровой оценки параметров УП.



# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

Другой подход основан на использовании схемы RAKE приёма СШП сигналов. Показано, что путём соответствующего выбора параметров схемы RAKE приёмника возможно подавление УП сигнала на выходе приёмника. Критерием оптимизации служит повышение отношения мощности полезного сигнала к мощности узкополосного сигнала на выходе RAKE приёмника. Существенной особенностью метода является прямая зависимость степени компенсации УП от количества лучей (переотражений), пришедших в приёмник.

# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

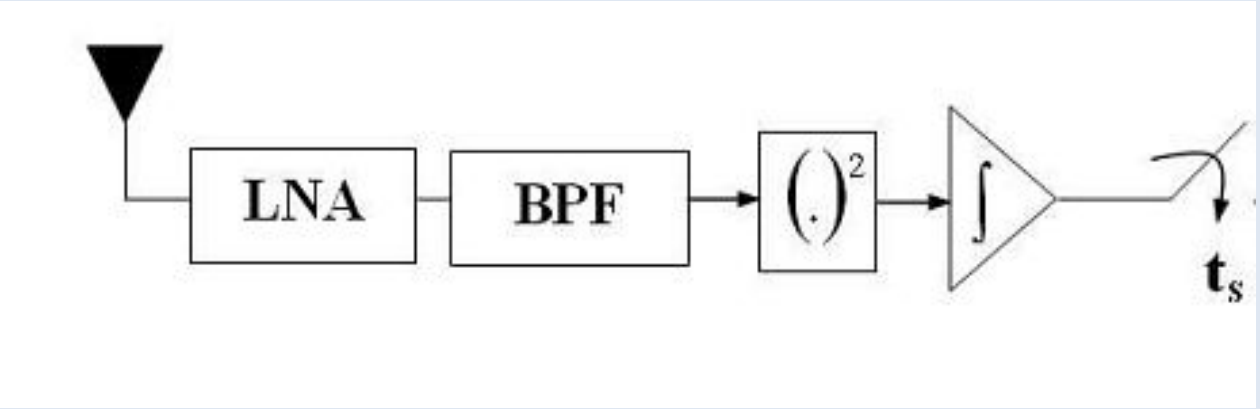
Использование режекторных фильтров как в радиодиапазоне, так и в низкочастотном диапазоне. Следует сказать, что данные методы трудно применимы из-за большого диапазона возможных положений УП внутри частотного диапазона СШП приёмопередающей системы, что требует большого банка режекторных фильтров.

Использование адаптивных фильтров, ведущих себя как режекторные фильтры, но использующих цифровую обработку для подстройки к частоте УП.

# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

Метод, основанный на смещении спектра сигнала в низкочастотную область с помощью оператора Teager-Kaiser и последующей фильтрации ФВЧ. Метод требует добавления двух элементов к схеме приёмника, один из которых – аппаратная реализация оператора Teager-Kaiser.

$$\psi(s(t)) = \dot{s}(t)^2 - s(t)\ddot{s}(t)$$



# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

Метод, в котором, принимаемый сигнал фильтруется полосовым фильтром с полосой пропускания, согласованной с полосой работы СШП системы, затем преобразуется в сигнал, амплитуда которого пропорциональна мощности входного сигнала. В результате этой последовательности операций формируется сигнал, в амплитуде которого содержится информация как от СШП сигнала, так и от УП сигнала в виде постоянной составляющей, и дальнейшая задача приёмника заключается в том, чтобы отделить полезный сигнал от помехи и осуществить демодуляцию полезного сигнала. Она может решаться различными методами в зависимости от схемы и методов приёма.

# Существующие методы компенсации узкополосной помехи

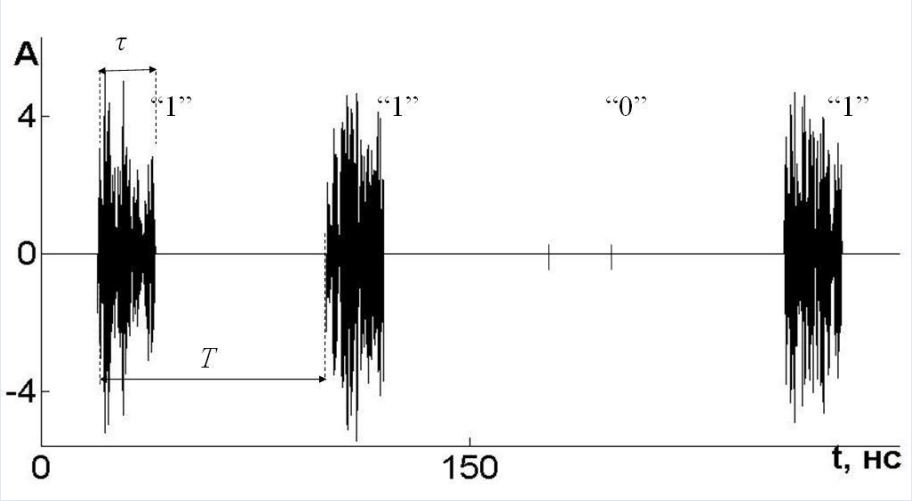
**Недостатки существующих методов**

- Большинство методов требуют точного знания параметров УП
- Процесс оценки параметров УП непосредственно в СВЧ области затруднён чрезвычайно высокой частотой дискретизации, требуемой для оцифровки СШП сигнала, и большим динамическим диапазоном АЦП.
- Сложность методов
- Факт временного отсутствия УП сводит на нет эффективность большинства методов

# Модель системы связи

Информация в ПХСС кодируется наличием хаотического радиоимпульса на заданной позиции при логической «единице» и отсутствием – при логическом «нуле».

Сигнал на входе приёмника




Сигнал на выходе приёмника

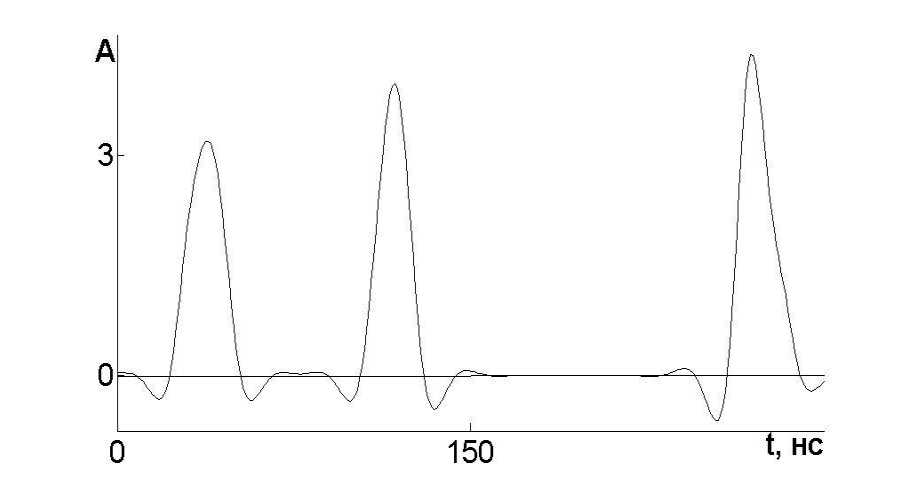
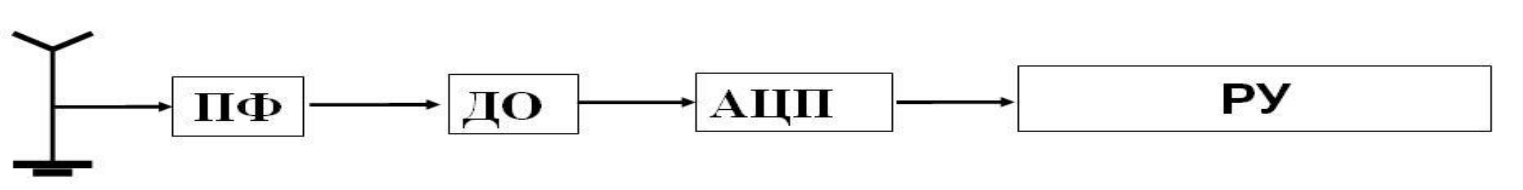



Схема приёмника

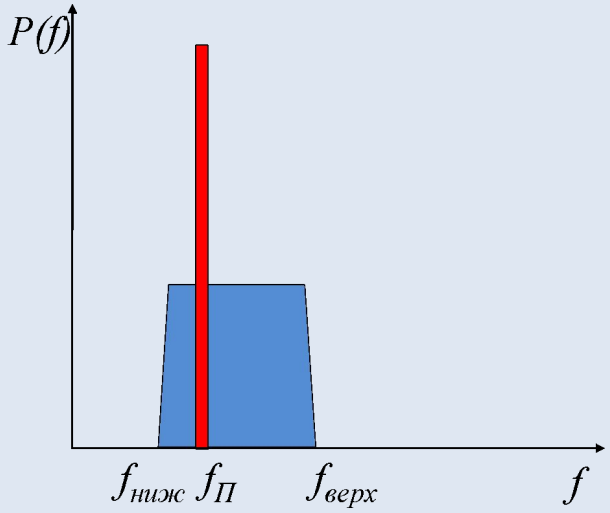


# Метод компенсации узкополосной помехи

## Детектирование сигнала

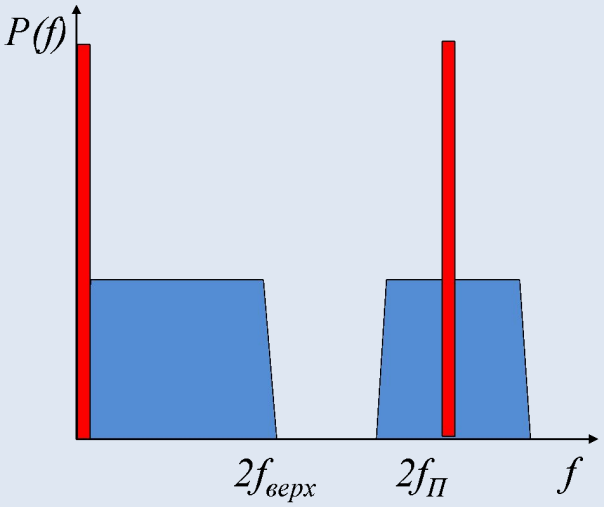
Если УП находится вне диапазона работы ПХСС, то предполагается, что в этом случае помеха вырезается полосовым фильтром на входе приемника.

Рассмотрим процесс преобразования сигнала $z(t)$ на входе приёмника, состоящего из суммы СШП сигнала $s(t)$ с узкополосной помехой $y(t)$.




$$z(t) = s(t) + y(t)$$

Спектр исходного сигнала



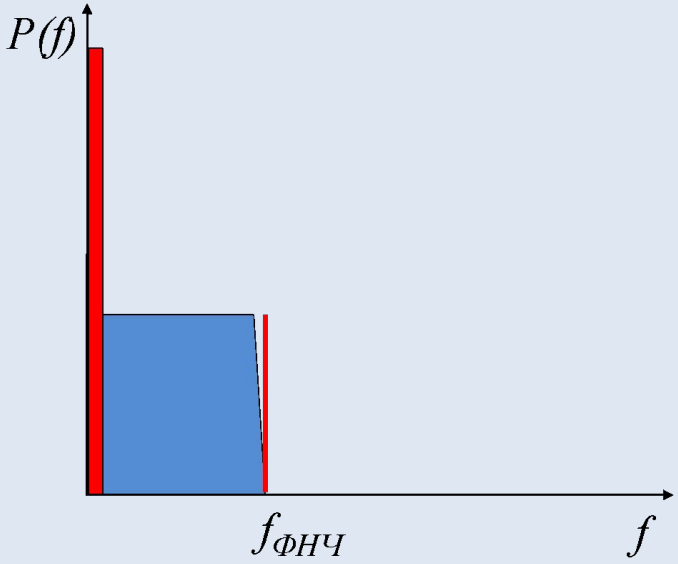

$$z^2(t) = s^2(t) + 2s(t)y(t) + y^2(t)$$

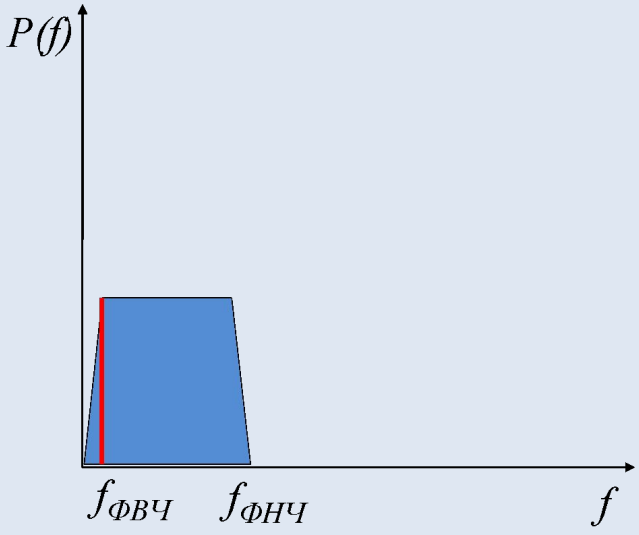
Спектр после квадратичного детектора

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Получение огибающей и устранение постоянной составляющей

Следующими этапами являются фильтрации ФНЧ, согласованного на длину импульса $\Delta f_{ФНЧ} = 1/\tau$ что эквивалентно интегрированию мощности импульса в пределах его длительности и фильтрация ФВЧ с целью устранить постоянную составляющую.




$$Z(t) = \int_{t-\tau}^{t} \left(s^2(p) + 2s(p)y(p) + y^2(p)\right)dp$$

Спектр после фильтрации ФНЧ

Спектр после фильтрации ФВЧ

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Модель СШП сигнала

Любой сигнал можно качественно представить в виде произведения огибающей функции на модулирующую гармонику с частотой и переменной фазой . Представим в этом виде СШП сигнал :

$$s(t) = a(t)\cos(\omega_C t + \Theta(t))$$

После квадратичного детектора $s^2(t) = a^2(t)\cos^2(\omega_C t + \Theta(t))$

$$s^2(t) = \frac{1}{2}a^2(t) + \frac{1}{2}a^2(t)\cos 2(\omega_C t + \Theta(t))$$

Таким образом, спектр СШП сигнала после квадратичного детектирования состоит из двух частей: в низкочастотной области и в высокочастотной области.

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Простая модель УП сигнала

Пусть роль УП играет одна гармоника $y(t) = A\cos(\omega_П t)$

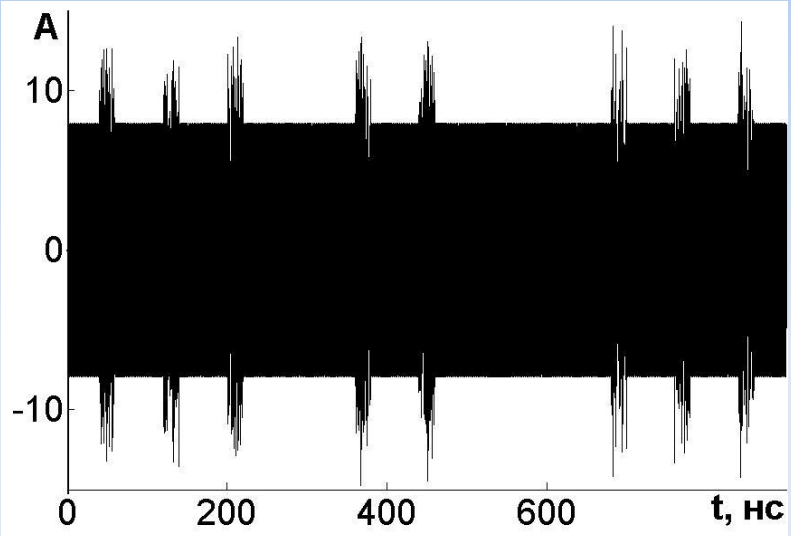
После квадратичного детектора $y^2(t) = A^2\cos^2(\omega_П t)$

Что можно записать в виде $y^2(t) = \dfrac{A^2}{2} + \dfrac{A^2\cos(2\omega_П t)}{2}$

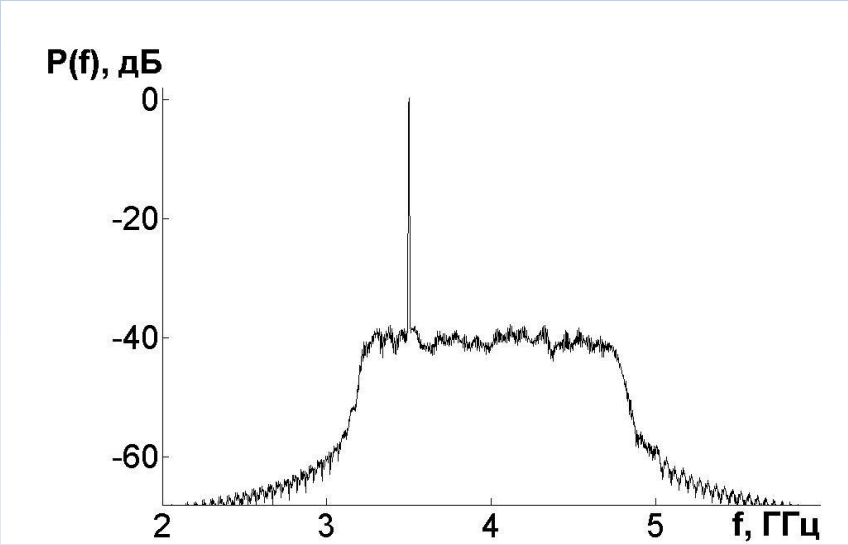
Таким образом, после квадратичного детектора в спектре УП появляется постоянная составляющая и гармоника с удвоенной частотой

# Метод компенсации узкополосной помехи

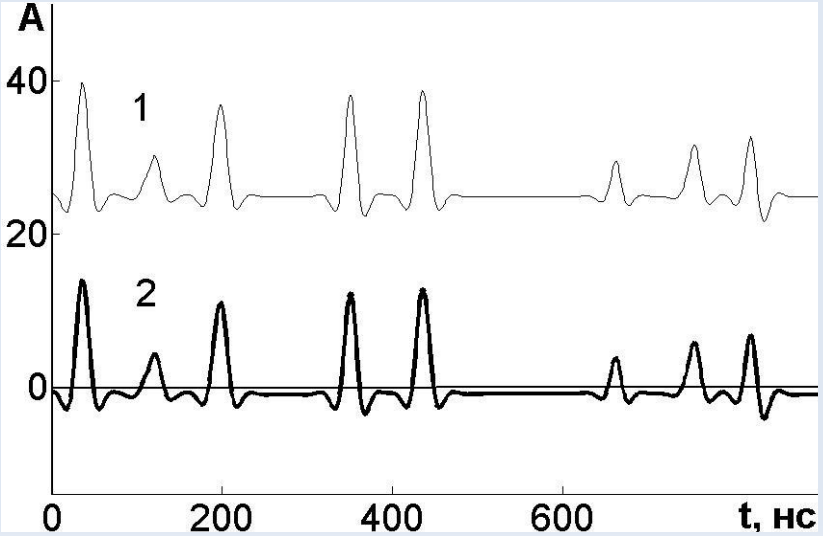
## Результаты моделирования для простой УП



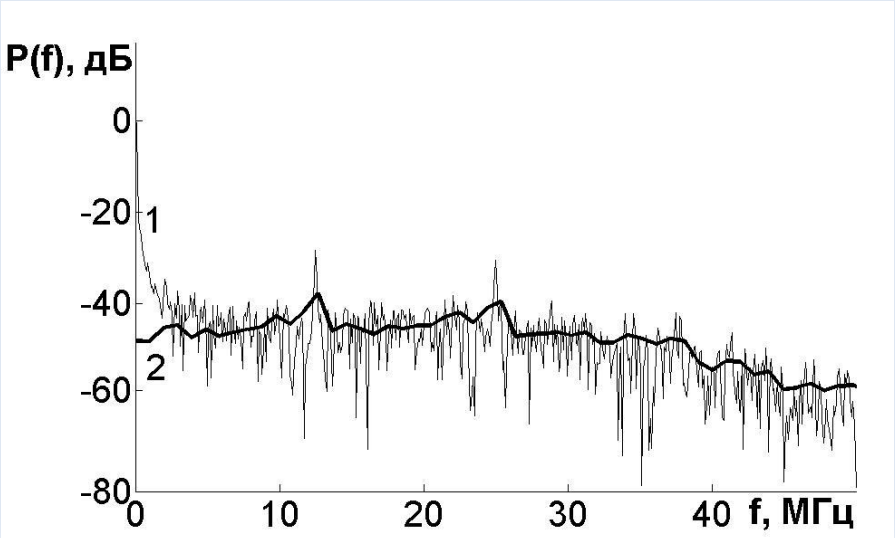

Сигнал на входе приёмника




Спектр сигнала на входе приёмника




Сигнал на выходе ФНЧ (1) и ФВЧ (2)




Спектр сигнала на выходе ФНЧ (1) и ФВЧ (2)

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Модель УП сигнала

В качестве более сложной модели УП возьмём следующую сумму:

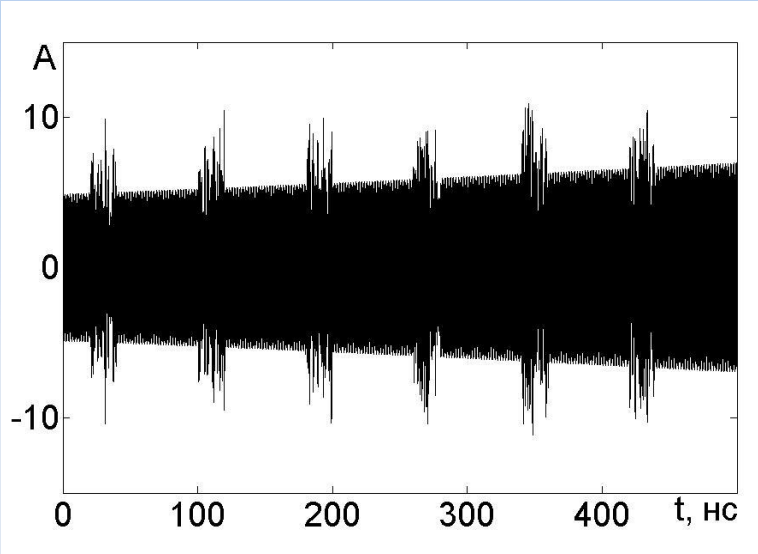
$$y(t) = \sum_{k=1}^{N} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k)$$

Которая преобразуется к виду

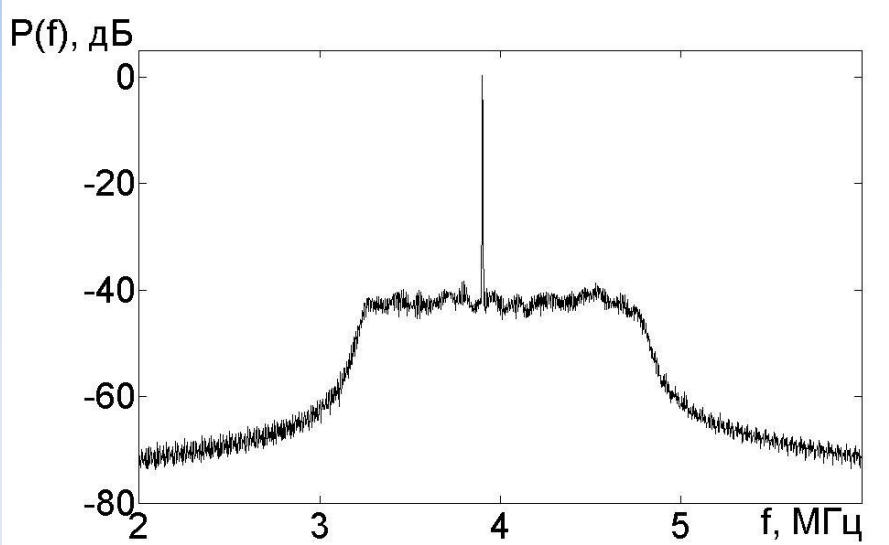
$$y^2(t) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N} A_k^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N} A_k^2 \cos(2\psi_k) + \sum_{k=1}^{N-1}\sum_{l=k+1}^{N} A_k A_l (\cos(\psi_k + \psi_l) + \cos(\psi_k - \psi_l))$$

# Метод компенсации узкополосной помехи

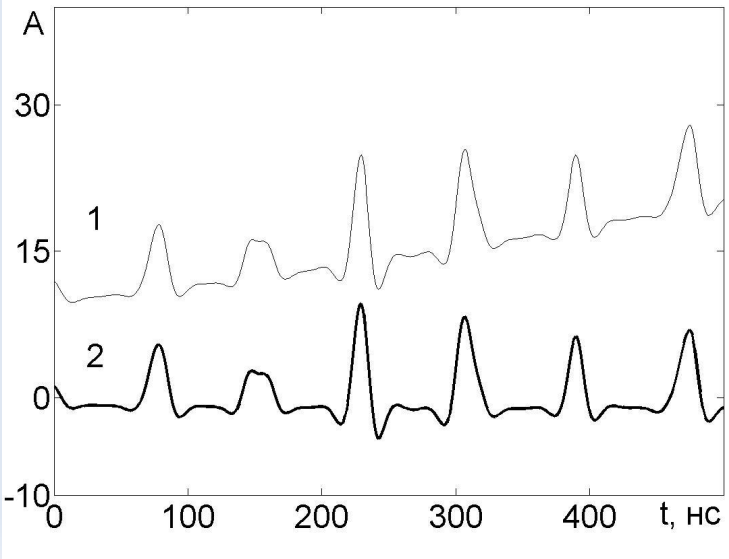
## Результаты моделирования для сложной УП



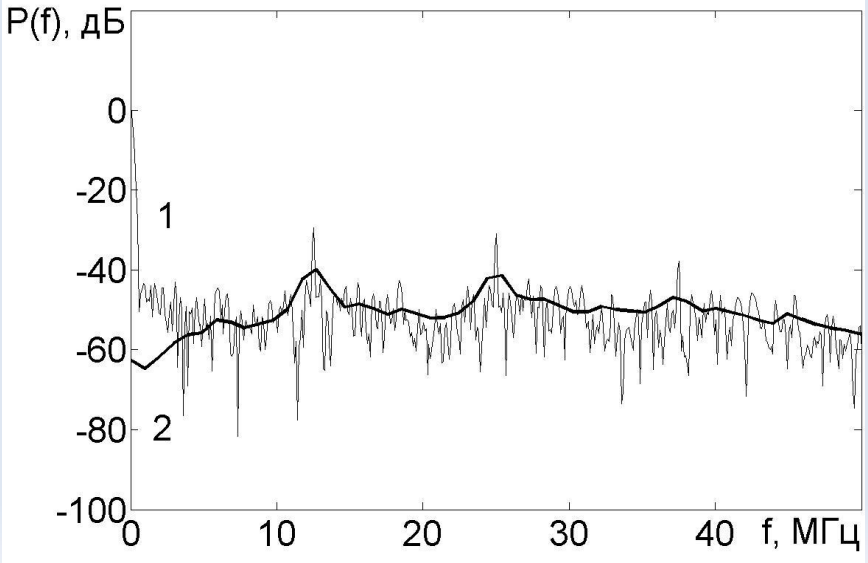

Сигнал на входе приёмника




Спектр сигнала на входе приёмника




Сигнал на выходе ФНЧ (1) и ФВЧ (2)




Спектр сигнала на выходе ФНЧ (1) и ФВЧ (2)

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Обработка ФНЧ

На выходе ФНЧ действует сигнал с амплитудой

$$Z(t) = \int_{t-\tau}^{t} \left(s^2(p) + 2s(p)y(p) + y^2(p)\right)dp$$

Причём, в силу некоррелированности СШП и УП сигналов, интеграл

$$\int_{t-\tau}^{t} s(p)y(p)dp \approx 0$$

Т. е. на выходе ФНЧ сигнал $Z(t) = \int_{t-\tau}^{t} \left(s^2(p) + y^2(p)\right)dp$

| ФНЧ устраняет | ФНЧ пропускает |
|---|---|
| Удвоенные частоты УП и СШП<br>Перекрёстные сост. УП со сложением<br>$\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{l=k+1}^{N} A_k A_l \cos(\psi_k + \psi_l)$ | Постоянную составляющую<br>Гармоники вблизи нулевых частот,<br>Причём у УП максимальной гармоникой будет<br>$\max_{\substack{k=1..N-1\\ l=k+1..N}} \{f_k - f_l\} = \Delta f_П$ |

# Метод компенсации узкополосной помехи

## Обработка ФВЧ

Таким образом, чтобы избавиться от помехи, частота среза ФВЧ должна быть не меньше ширины УП $\Delta f_{П} = \max\limits_{\substack{k=1..N-1 \\ l=k+1..N}} \{f_k - f_l\}$

Размер полезной части сигнала уменьшается на величину, вырезаемую ФВЧ.

| ФВЧ устраняет | ФВЧ пропускает |
|---|---|
| Узкополосную помеху и часть сигнала $(0..\Delta f_{П})$ | Всё остальное $\tau - 1/\Delta f_{П}$ |

# Выбор параметров модели

Параметры СШП сигнала

$$f_{ниж} = 3\,ГГц$$
$$f_{верх} = 5\,ГГц$$
$$\tau_c = 20\,нс$$
$$d_c = 4$$

Параметры УП сигнала

$$f_П = 3.47\,ГГц$$
$$\Delta f_П = 1\,МГц$$

Параметры ФНЧ

$$f_{ФНЧ} = 1/\tau_c = 50\,МГц$$

2й порядок фильтра

Параметры ФВЧ

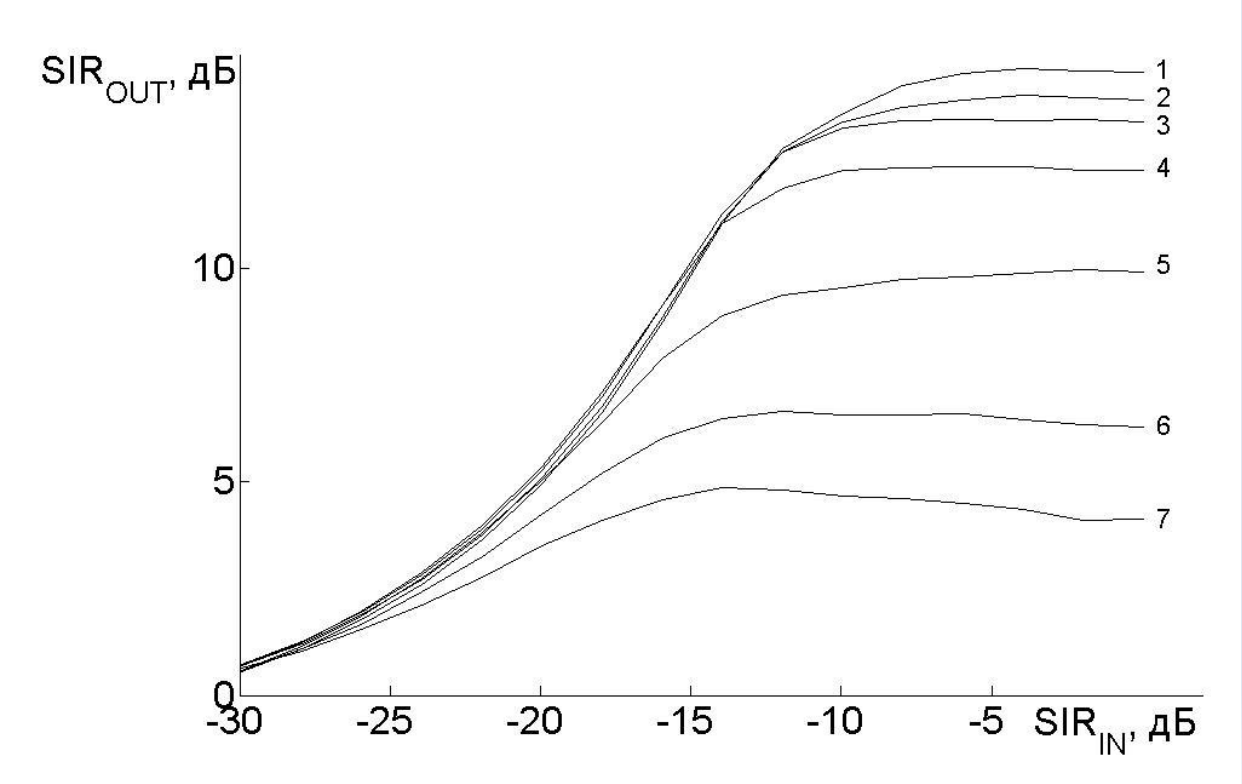
$$f_{ФВЧ} = 1..20\,МГц$$

1й порядок фильтра

# Исследование эффективности метода

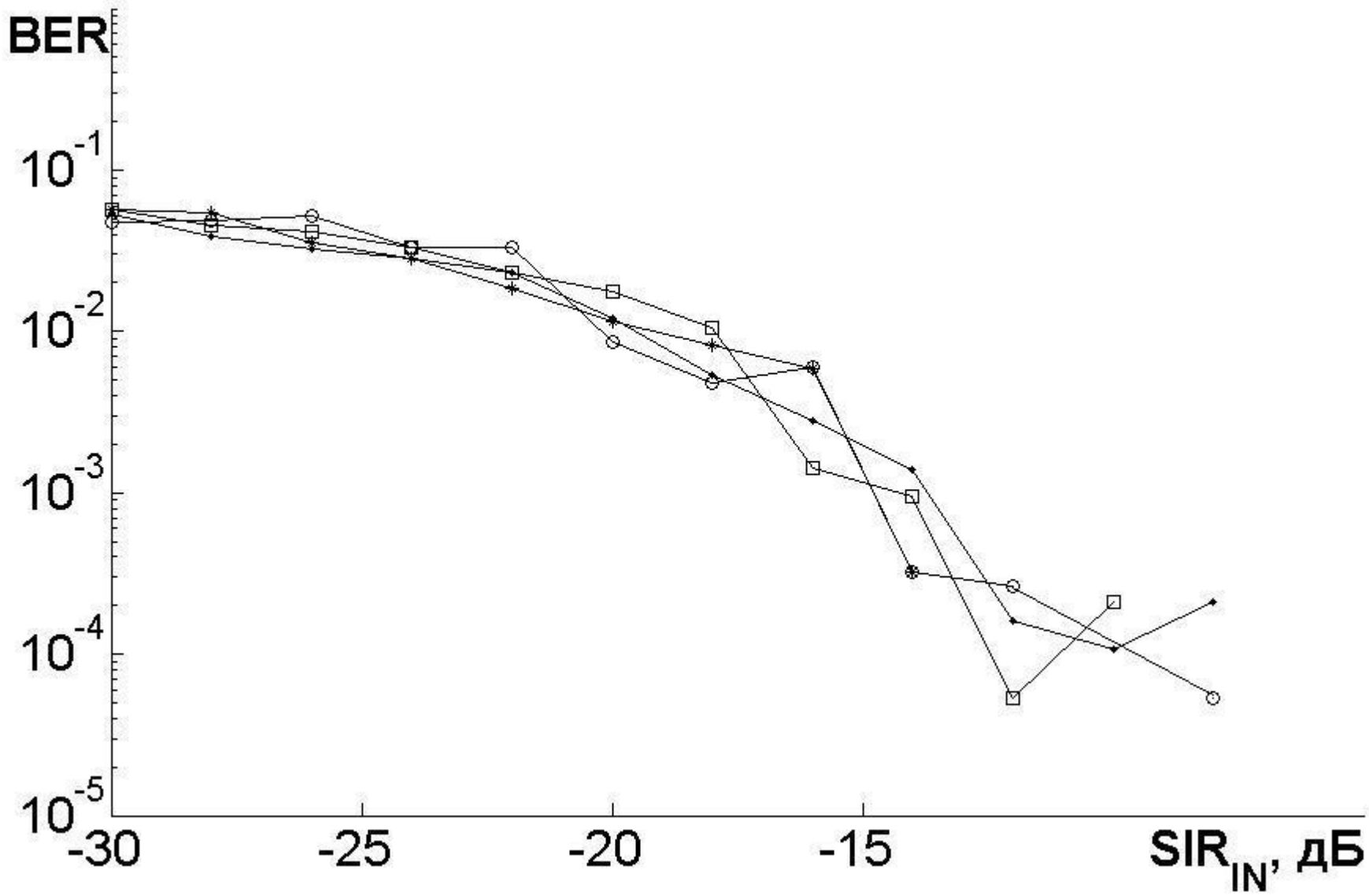
**Отношение сигнал-помеха**

Предлагается ввести такую характеристику каждого импульса, как отношение мощности положительной части импульса к мощности отрицательной части импульса. Эта величина будет характеризовать степень искажения импульса.



# Исследование эффективности метода

**Вероятность ошибки на бит**



# Заключение

В работе проанализирована возможность подавления узкополосной помехи в прямохаотический схеме связи.

Показано, что в рамках указанной схемы возможно применение метода компенсации, основанного на подавлении узкополосного сигнала в низкочастотном диапазоне (после выделения огибающей потока хаотических радиоимпульсов). Существенной особенностью метода является отсутствие необходимости в точном знании положения помехи в пределах полосы работы системы.

Введение в структуру ПХСС дополнительных элементов, компенсирующих помеху, сохраняет возможность определения огибающей хаотических радиоимпульсов методами обработки, применяемых в настоящий момент, т. е. не требуется существенно менять аппаратную часть прямохаотических приёмопередатчиков.

Путём численного моделирования показано, что вероятность ошибки на бит 10^-3 достигается при отношении сигнал-помеха на уровне –15 дБ. Увеличение отношения сигнал помеха до –10 дБ приводит к достижению вероятности ошибки на бит меньшей 10^–5.