

УДК 621.396.24

## КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЛЧМ В СИСТЕМАХ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ

**Колчев Алексей Анатольевич<sup>1</sup>**, доцент

*e-mail:* [AAKolchev@kpfu.ru](mailto:AAKolchev@kpfu.ru)

**Егошин Иван Александрович<sup>2</sup>**, младший научный сотрудник

*e-mail:* [jungl91@mail.ru](mailto:jungl91@mail.ru)

**Зыков Евгений Юрьевич<sup>1</sup>**, доцент

*e-mail:* [Evgeniy.Zykov@kpfu.ru](mailto:Evgeniy.Zykov@kpfu.ru)

<sup>1</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>2</sup> Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Республика Марий-Эл, Россия

**Аннотация.** В работе представлены алгоритмы обработки непрерывного коротковолнового сигнала с ЛЧМ в многолучевом ионосферном радиоканале с частотной дисперсией. Алгоритмы предполагают как дискретный, так и диффузный характер многолучевости. В экспериментах реализованы методики оптимальной и квазиоптимальной фильтрации сигналов в таких каналах. Показана эффективность предложенных алгоритмов.

**Ключевые слова:** ионосфера, ионозонд, сигнал с линейной частотной модуляцией, обработка сигналов.

## QUASI-OPTIMAL SIGNAL PROCESSING WITH CHIP IN SHORT-WAVE COMMUNICATION SYSTEMS

**Kolchev Alexey Anatolevich<sup>1</sup>**, Associate Professor

*e-mail:* [AAKolchev@kpfu.ru](mailto:AAKolchev@kpfu.ru)

**Igoshin Ivan Aleksandrovich<sup>2</sup>**, Junior researcher

*e-mail:* [jungl91@mail.ru](mailto:jungl91@mail.ru)

**Zykov Evgeniy Yurevich<sup>1</sup>**, Associate Professor

*e-mail:* [Evgeniy.Zykov@kpfu.ru](mailto:Evgeniy.Zykov@kpfu.ru)

<sup>1</sup> Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>2</sup> Mari State University, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russia

**Abstract.** The paper presents algorithms for processing a continuous short-wave signal with chirp in a multipath ionospheric radio channel with frequency dispersion. The algorithms assume both discrete and diffuse multipath channels. The experiments implemented methods for optimal and quasi-optimal filtering of signals in such channels. The effectiveness of the proposed algorithms is shown.

**Keywords:** ionosphere, ionosonde, chirp signal, signal processing.

## Введение

Из-за наличия магнитного поля Земли, слоистости ионосферы, многократного отражения от земной поверхности распространение коротких радиоволн (КВ) в ионосфере является многомодовым. Кроме того, ионосферные КВ радиоканалы обладают частотной дисперсией. Поэтому сигналы на выходе ионосферного радиоканала испытывают замирания. Разделяют радиоканалы с медленными общими замираниями и радиоканалы с быстрыми селективными по частоте замираниями [1-2]. Для борьбы с замираниями используют различные схемы квазиоптимальной обработки сигналов на выходе таких каналов.

Цель работы – экспериментальные исследования применимости различных схем квазиоптимальной обработки для КВ сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

### 1. Основные технические положения

Комплексный коэффициент передачи КВ радиоканала  $H(f)$  с начальной частотой  $f_0$  и полосой  $\Delta f$  можно представить как:  $H(f) = |H(f_0)| \cdot \exp(j \cdot 2\pi \cdot \tau \cdot (f - f_0))$ , где  $|H(f_0)|$  – амплитуда передаточной функции.

Вариации амплитуды сигнала на выходе канала распространения возникают из-за его многомодовости. В этом случае сигнал на выходе радиоканала представим в виде:  $a_{\text{вых}}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i \cdot a_{\text{вх}}(t - \tau_i)$ , где  $M$  – количество мод распространения,  $\mu_i$  – амплитудный множитель,  $\tau_i$  – время распространения сигнала по  $i$ -му лучу.

Пусть  $\Delta \tau = \max \tau_i - \min \tau_i$ . В многомодовом радиоканале  $\Delta t \approx \Delta \tau$ . При  $\Delta \tau \cdot \Delta f \ll 1$  реализуется канал с общими замираниями. Если  $\Delta \tau \cdot \Delta f \gg 1$ , то реализуется канал с селективными по частоте замираниями [1].

В зависимости от модели замираний в радиоканале формируется и схема приема сигнала на выходе канала. Если принимается сигнал  $A(t)$ , имеющий спектр  $S(f)$ , то в условиях аддитивного гауссового шума оптимальный фильтр для принимаемого сигнала имеет следующую передаточную функцию:

$$K(f) = S^*(f), \quad (1)$$

где  $*$  – знак комплексного сопряжения. Такой фильтр будет оптимальным по отношению сигнал/шум (ОСШ) для любой модели радиоканала, т.к. рассматривается сигнал на выходе канала.

В некоторых случаях, например, для канала с частотной дисперсией и дискретной многолучевостью существуют упрощенные схемы приема сигналов с ЛЧМ. Рассмотрим далее такую схему.

Пусть излучается непрерывный ЛЧМ сигнал, который можно записать в виде:  $a_{\text{вх}}(t) = a_0 \cdot \exp[j(2\pi f_0 t + \pi \dot{f} t^2)]$ ,  $t \in [0, T]$ ,

где  $a_0$  – амплитуда сигнала;  $f_0$  – начальная частота сигнала

$\dot{f} = df / dt$  – скорость изменения частоты;

$T$  – длительность сигнала.

Мгновенная частота ЛЧМ сигнала связана с мгновенным временем линейным соотношением:  $f = f_0 + \dot{f} \cdot t$ .

Принятый сигнал  $a_{\text{out}}(t)$  поступает на смеситель, где происходит его умножение на сигнал гетеродина. Сигнал гетеродина формируется таким образом, чтобы он был комплексно-сопряженным излученному сигналу. Далее происходит низкочастотная фильтрация сигнала разностной частоты и анализ результатов БПФ этого сигнала. Таким преобразованиям сигнала соответствуют следующие математические выражения:



$$A(t) = a_{out}(t) \cdot a_{in}^*(t), \quad S(F) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) \cdot e^{-j2\pi Ft} dt, \quad (2)$$

где  $A(t)$  – сигнал разностной частоты;

$S(F)$  – спектр сигнала разностной частоты.

Мгновенная частота разностного сигнала  $i$ -й моды равна  $F_i = \dot{f} \tau_i$ , где  $\tau_i$  – время запаздывания сигнала  $i$ -й моды. Амплитуда спектральной составляющей, соответствующей частоте  $F_i$  пропорциональна коэффициенту прохождения  $|H_i|$  через ионосферный радиоканал для этой моды ( $|S(F_i)| \sim |H_i|$ ).

Для оценки параметров радиоканала в широкой полосе частот излучаемого сигнала  $\Delta f = \dot{f}T$ , сигнал разбивается на элементы с полосой  $\Delta f_e$  (полоса радиоканала) длительностью  $T_e = \Delta f_e / \dot{f}$  и центральной частотой  $f_{\ominus}$ . Каждый  $k$ -й элемент сигнала подвергается спектральному анализу и определяются амплитуда  $|H_{ki}|$  и задержка  $\tau_{ki}$  соответствующие  $i$ -й моде на частоте  $f_k$ .

Таким образом, для каждой дискретной моды распространения можно построить частотные зависимости  $|H_i| = |H_i(f)|$  и  $\tau_i = \tau_i(f)$  и реализовать схему квазиоптимального приема. При этом передаточная функция канала с дискретной многолучевостью запишется в виде:

$$H(f) = \sum_{i=1}^M |H_i(f)| \cdot \exp(j \cdot 2\pi \cdot \int_{f_0}^f \tau_i(F) dF). \quad (3)$$

В квазиоптимальной схеме приема предлагается использование для сигнала  $A_i(t)$  разностной частоты  $i$ -й моды дополнительного фильтра вида:

$$K_0(f) = \exp(-j \cdot 2\pi \cdot \int_{f_0}^f \tau_i(F) dF), \quad (4)$$

что корректирует дисперсионные искажения сигнала в канале с передаточной функцией (3) [3].

Итак, если широкополосный КВ канал для отдельной ионосферной моды распространения ЛЧМ сигнала соответствует каналу с дискретной многолучевостью, то величины отношения сигнал/шум на выходе приемника после обработки в соответствии с полной схемой, предполагающей использование оптимального фильтра (3) и квазиоптимальной схемой должны быть близки. Если реализуется канал с непрерывной многолучевостью, то квазиоптимальная схема будет давать меньшее значение отношения сигнал/шум по сравнению с оптимальной схемой приема.

## 2. Экспериментальное сравнение эффективности оптимальной и квазиоптимальной схем приема

Оптимальная (фильтр с передаточной функцией (1)) и квазиоптимальная (фильтр с передаточной функцией (4)) схемы фильтрации были реализованы нами в экспериментах по квазивертикальному зондированию ионосферы сигналами с ЛЧМ в г. Йошкар-Ола (расстояние между приемником и передатчиком 3 км).

Излучалось одновременно два ЛЧМ сигнала с  $\dot{f} = 100$  кГц/си разностью начальных частот  $f_{01} - f_{02} = 2$  кГц (такая разность частот обеспечивает некоррелированность шумов в каналах).

Прием производился с помощью цифрового приемника на базе USRP 2.0, а обработка производилась в соответствии с выражением (2). Использование цифрового приемника позволило оцифровывать и записывать сигнал непосредственно с выхода антенны и использовать для одного и того же записанного сигнала различные способы обработки.

Пример соответствующей ионограммы приведен на рисунке 1. На этой ионограмме наблюдаются земные и отраженные от ионосферы (обыкновенная и необыкновенная моды слоя 1F2) лучи, соответствующие двум излученным сигналам. Амплитуда сигнала с меньшей начальной частотой (меньшая задержка на ионограмме) была на 7,5 дБ больше амплитуды сигнала с большей начальной частотой. Принимаемые отраженные от ионосферы ЛЧМ сигналы с меньшей начальной частотой (большая амплитуда) использовались нами в качестве «измерительных» сигналов, по которым оценивались зависимости  $|H_i(f)|$  и  $\tau_i(f)$ , а также передаточная функция  $K(f)$ .

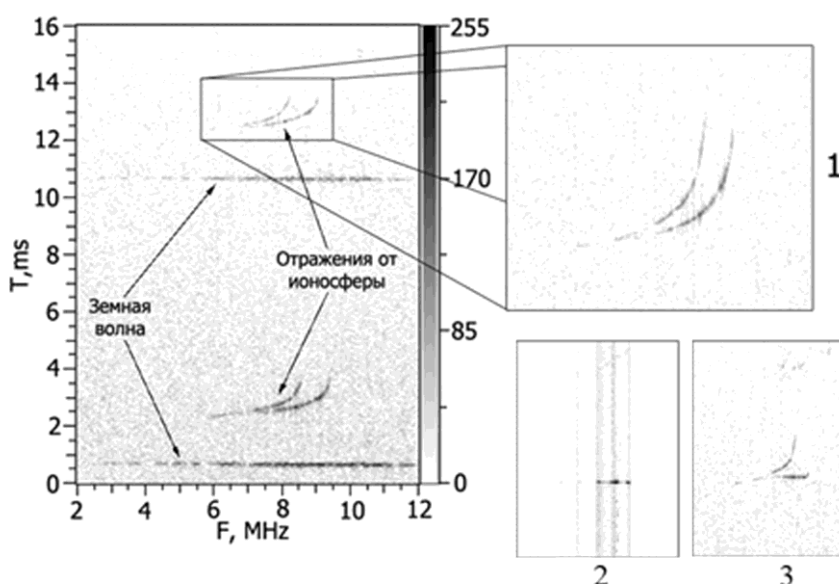


Рисунок 1 – Ионограмма ЛЧМ сигнала полученная в режиме ВЗ, в 7:32:00 UTC 14.10.2014, г. Йошкар-Ола

Найденные зависимости использовались для дополнительной фильтрации отраженных от ионосферы ЛЧМ сигналов с большей начальной частотой («корректируемые» сигналы, обозначены цифрой 1 на рис. 1) как с помощью фильтров (3) (полная схема оптимальной фильтрации), так и с помощью фильтров (6) (квазиоптимальная схема фильтрация). Дополнительной фильтрации подвергалась необыкновенная компонента моды 1F2 в диапазоне частот 7,6-9,4 МГц, где ее можно было отделить от обыкновенной компоненты. Цифрой 2 на рис. 1 показаны результаты оптимальной фильтрации, а цифрой 3 – результаты квазиоптимальной фильтрации выделенной моды. Из этих рисунков видно, что как оптимальная, так и квазиоптимальная обработка приводят к «выпрямлению» фильтруемой моды.

Чтобы сравнить выигрыш предлагаемой схемы приема по сравнению с известной схемы квазиоптимального приема, определялись средние значения отношения сигнал/шум для разных полос частот в диапазоне анализа. Результаты обработки показаны на рисунке 2. На

этом рисунке сплошной линией изображена исходная зависимость отношения  $S/N$ , пунктирной линией – зависимость отношения  $S/N$  после оптимальной фильтрации, точками и тире – зависимость отношения  $S/N$  после квазиоптимальной фильтрации. Из этих рисунков видно, что как оптимальная, так и квазиоптимальная обработка приводят к «выпрямлению» фильтруемой моды.

Так как  $\Delta f_e = \dot{f} \cdot T_e$  то, меняя длительность элемента анализа  $T_e$  для записанного сигнала, можно анализировать результаты фильтрации для каналов с различной полосой частот  $\Delta f_e$ . В эксперименте 14 октября 2014г. длительность элемента анализа варьировалась так, чтобы  $\Delta f_e$  изменялась от 10 до 400кГц.

Для сравнения эффективности двух описанных схем приема ЛЧМ сигнала, определялись средние значения отношения сигнал/шум для разных полос частот в диапазоне анализа. Результаты обработки показаны на рисунке 2. На этом рисунке сплошной линией изображена исходная зависимость отношения  $S/N$ , пунктирной линией – зависимость отношения  $S/N$  после оптимальной фильтрации, точками и тире – зависимость отношения  $S/N$  после квазиоптимальной фильтрации.

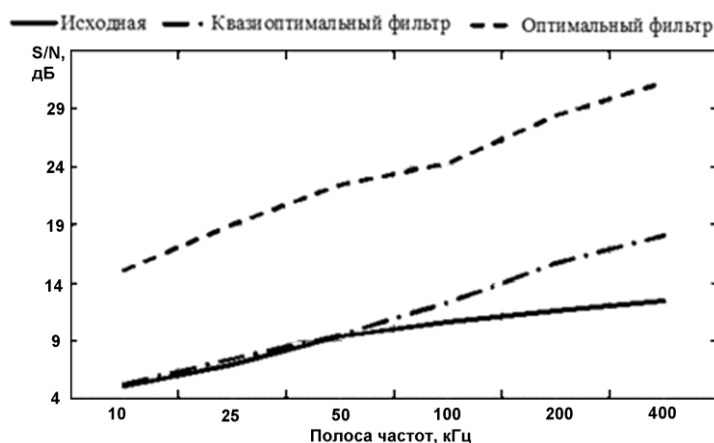


Рисунок 2 – Графики зависимости ОСШ от полосы частот различных схем приема

Выигрыш в отношении сигнал/шум при оптимальной фильтрации прямо пропорционален энергии сигнала и обратно пропорционален спектральной плотности помехи. Так как в проведенных экспериментах спектральная плотность помехи в полосе анализа менялось незначительно, то основной выигрыш обеспечивался увеличением энергии сигнала. Для элемента ЛЧМ сигнала с постоянной мощностью энергия пропорциональна  $T_e$  и, соответственно,  $\Delta f_e$ . Если изменить полосу частот канала  $\Delta f_e$  с 10 до 400 кГц, то энергия элемента сигнала линейно увеличивается в 40 раз (на 16 дБ), что полностью соответствует экспериментальным результатам при полной схеме фильтрации. Если использовать упрощенный квазиоптимальный фильтр, то выигрыш в отношении сигнал/шум появляется только тогда, когда полоса канала  $\Delta f_e$  становится равной 100 кГц, а при использовании предлагаемой схемы обработки сигнала выигрыш в отношении сигнал/шум появляется и при  $\Delta f_e = 10$  кГц. Эти результаты говорят о том, что даже отдельные каналы распространения магнитоионных компонент надо считать каналами с непрерывной многолучевостью.

### Заключение

Рассмотрены схемы фильтрации сигнала с ЛЧМ в случае радиоканала с дискретной многолучевостью и частотной дисперсией, а также с диффузной многолучевостью.

Разработана методика организации оптимального приема в произвольны ионосферных КВ радиоканалах. Произведено сравнение предлагаемой схемы приема и известных ранее. Установлено, что даже для каналов распространения отдельных магнитоионных мод дает выигрыш по сравнению с квазиоптимальными схемами приема.

**Список литературы:**

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Сов.радио, 1970. 325 с.
2. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. М.: Связь. 1971. 376 с.

