

УДК 621.396.24

КВАЗИОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЛЧМ В СИСТЕМАХ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ

Колчев Алексей Анатольевич¹, доцент

e-mail: AAKolchev@kpfu.ru

Егошин Иван Александрович², младший научный сотрудник

e-mail: jungl91@mail.ru

Зыков Евгений Юрьевич¹, доцент

e-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

¹ Казанский федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

² 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 Anatolevich¹, Associate Professor

e-mail: AAKolchev@kpfu.ru

Igoshin Ivan Aleksandrovich², Junior researcher

e-mail: jungl91@mail.ru

Zykov Evgeniy Yurevich¹, Associate Professor

e-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

¹ Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

² 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 Δf 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, μ_i – амплитудный множитель, τ_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 τ_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 Δf_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 τ_{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 $K(f)$.

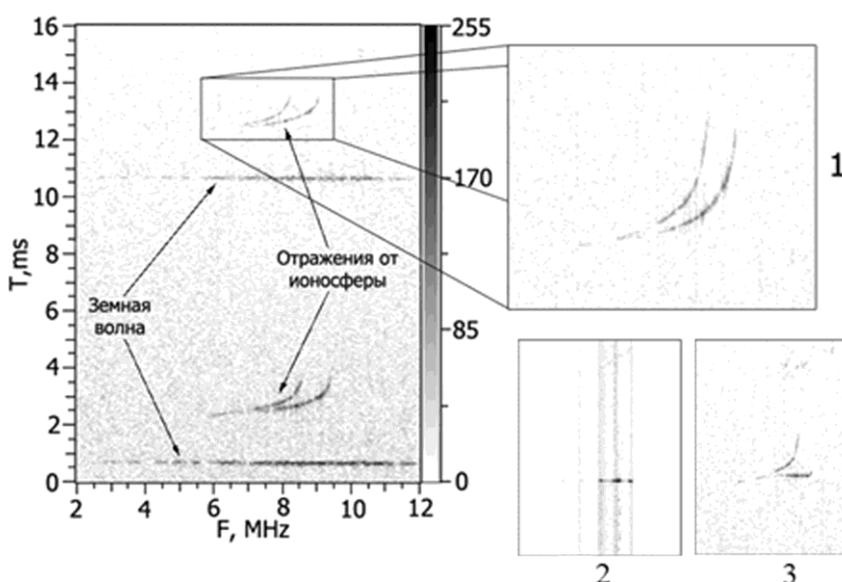


Рисунок 1 – Ионограмма ЛЧМ сигнала полученная в режиме ВЗ, в 7:32:00 UTC 14.10.2014, г. Йошкар-Ола

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 $\Delta f_e = f \cdot T_e$ то, меняя длительность элемента анализа T_e для записанного сигнала, можно анализировать результаты фильтрации для каналов с различной полосой частот Δf_e . В эксперименте 14 октября 2014г. длительность элемента анализа варьировалась так, чтобы Δf_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.

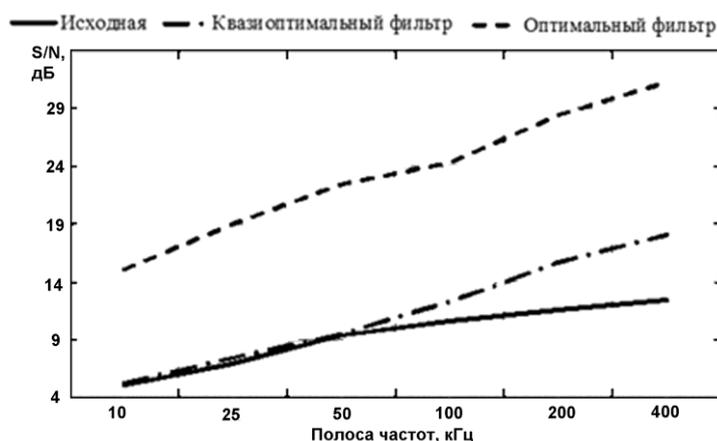


Рисунок 2 – Графики зависимости ОСШ от полосы частот различных схем приема

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, Δf_e . Если изменить полосу частот канала Δf_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 Δf_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.

