

УДК 621.391:551.510.535.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ

Г.В. Богданов, В.Д. Сизиков

### RESEARCH INTO IONOSPHERE USING THE DIGITAL PROCESSING OF CHIRP SOUNDING SIGNALS

G.V. Bogdanov, V.D. Sizikov

Предложен способ реализации цифрового приемника ЛЧМ-сигналов зондирования. Приведены расчетные соотношения для основных параметров цифрового приемника ЛЧМ-сигналов. Предложена структурная схема цифрового приемника ЛЧМ-сигналов.

Приведены экспериментальные данные наклонного и слабонаклонного зондирования ионосферы для различных радиотрасс.

Method for realizing the digital receiver of the chirp sounding signal is suggested. Calculated relationships for main parameters of the digital receiver of the chirp signal are presented. The block diagram of the digital receiver of the chirp signal is suggested.

The experimental data of the ionosphere oblique and slightly-oblique sounding for various radio channels are presented.

#### Способ реализации цифрового приемника ЛЧМ-сигналов зондирования

Линейная частотная модуляция (ЛЧМ) широко применяется в зарубежных системах трассового зондирования ионосферы. Использование ЛЧМ-сигналов позволяет значительно снизить мощность излучения передающего устройства по сравнению с использованием импульсных сигналов [1]. Трассовое зондирование ионосферы предполагает измерение основных характеристик распространения сигнала зондирования на выбранной трассе в определенное время суток и года, а именно, определение межмодовых задержек распространения сигнала на трассе, амплитудно-частотной характеристики трассы, максимально и минимально применимых частот (МПЧ и МНЧ) и оптимальных рабочих частот (ОРЧ).

В России ЛЧМ-зондирование пока не находит широкого применения по причине отсутствия необходимой для этого техники. На сегодняшний день приемные устройства декаметрового (ДКМ) диапазона в основном строятся по супергетеродинной схеме с узкополосным перестраиваемым преселектором на входе, а цифровая обработка сигналов применяется на выходе линейного тракта приема. Применение типовых аналоговых приемных устройств ДКМ-диапазона для целей ЛЧМ-зондирования ионосферы, как правило, требует существенной их доработки: увеличения скорости перестройки по частоте преселектора и синтезатора частоты, улучшения линейности АЧХ преселектора и сохранения непрерывности фазы при формировании опорного ЛЧМ-сигнала синтезатором частоты, оснащения системой временной синхронизации. Из-за конечного времени перестройки преселектора и синтезатора по частоте появляются дополнительные амплитудные и фазовые искажения принимаемого ЛЧМ-сигнала.

Применение схемы с неперестраиваемым широкополосным преселектором, содержащим фильтр нижних частот, граничная частота которого равна верхней частоте принимаемого диапазона (30 МГц), требует выбора первой ПЧ более 35 МГц. При высокой первой ПЧ ФНЧ подавляет частоты зеркального

канала. Однако в этом случае возрастают требования к линейности тракта усиления высокой частоты и преобразователя частоты. Для уменьшения числа побочных каналов приема и для упрощения приемного устройства число преобразований частоты должно быть сведено к минимуму [2].

Общая тенденция развития радиоэлектроники – переход к цифровой обработке сигналов. До недавнего времени переход к цифровой обработке сдерживался отсутствием высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), преобразователей частоты и высокопроизводительных сигнальных процессоров. В настоящее время выпускаются быстродействующие 14- и 16-разрядные АЦП с максимальной частотой преобразования, равной 65–2500 МГц, например AD6644, AD6645, AD7680, AD7687, AD9260 (Analog Devices) [3]. В качестве преобразователя частоты удобно применение СБИС семейства DDC (цифровых конвертеров частоты), например, AD6620 (Analog Devices), GC4016 (Texas Instruments), которые включают в себя цифровые синтезаторы частоты, цифровые умножители, цифровые ФНЧ и компрессоры частоты дискретизации. Ожидается появление на рынке первого отечественного DDC СБИС 1288ХК1Т, разработанного компанией «Элвис» [4].

В данной работе исследовалась возможность построения цифрового приемника непрерывных ЛЧМ-сигналов по схеме прямого усиления с широкополосным неперестраиваемым преселектором на входе. Известно, что приемные устройства, построенные по схеме прямого усиления, характеризуются низкой селективностью. Однако в данном случае основными предпосылками выбора схемы прямого усиления были следующие:

- 1) большая база ЛЧМ-сигналов, которая позволяет получить высокую чувствительность и помехозащищенность приемного устройства;
- 2) последовательное сканирование зондируемого диапазона частот с заданной скоростью девиации частоты, вследствие чего стационарные помехи преобразуются в кратковременные импульсные помехи;
- 3) возможность реализации полосы пропускания порядка 1–10 Гц при анализе сжатого ЛЧМ-сигнала;



Рис. 1. Структурная схема цифрового приемника ЛЧМ-сигналов зондирования.

- 4) отсутствие побочных каналов приема;
- 5) попытка приблизить цифровую обработку к антенне.

Из теории цифровой обработки сигналов известно, что основным элементом, который определяет качественные показатели цифрового приемного устройства, такие как динамический диапазон и чувствительность, является блок дискретизации и квантования (БДК), поскольку в нем возникают специфические ошибки.

При дискретизации – это ошибки, связанные с наложением спектров и апертурной неопределенностью стоба дискретизации, а при квантовании – необходимость отождествления непрерывной входной величины с одним из фиксированных значений.

Учитывая, что в первом приближении все эти погрешности независимы, суммарный уровень помех БДК в полосе Найквиста будет определяться по формуле [5]:

$$U_{п\ БДК} = \sqrt{U_{днс}^2 + U_{да}^2 + U_{шк}^2}, \quad (1)$$

где  $U_{днс}$  – уровень помех, возникающих при дискретизации за счет наложения спектров;  $U_{да}$  – за счет апертурной неопределенности стоба дискретизации;  $U_{шк}$  – за счет шума квантования.

$U_{днс}$  определяется частотой дискретизации и АЧХ антиэлайзингового фильтра.

$U_{да}$  при равномерной дискретизации численно равен приращению сигнала в течение апертурной дрожи и примерно определяется выражением [5]:

$$U_{да}(t_i) \approx U'(t_i)t_a, \quad (2)$$

где  $t_a$  – время апертурной неопределенности.

$U_{шк}$  определяется по следующей формуле [5]:

$$U_{шк\ \Delta f} = \frac{U_{max}}{2^{n-1}} \sqrt{\frac{\Delta f_c}{6F_d}} \quad (3)$$

где  $U_{max}$  – максимально возможный уровень сигнала на входе АЦП;  $n$  – количество разрядов АЦП;  $\Delta f_c$  – ширина полосы сигнала, Гц;  $F_d$  – частота дискретизации, Гц.

Число  $n$  двоичных разрядов АЦП, которое требуется для обеспечения заданного свободного динамического диапазона цифрового приемного устройства можно определить по следующей формуле [6, 7]:

$$n = 3.3321 \lg \left( 2a10^{\frac{D}{20}} \sqrt{\frac{\Delta f_c}{F_d}} \right), \quad (4)$$

где  $n$  – необходимое количество двоичных разрядов АЦП;  $D$  – необходимый свободный динамический диапазон, дБ;  $\Delta f_c$  – ширина полосы сигнала, Гц;  $F_d$  – частота дискретизации, Гц;  $a$  – коэффициент пропорциональности, как правило, близкий единице.

В данном случае на основные характеристики цифрового приемника ЛЧМ-сигналов будут одно-

временно влиять параметры БДК и анализатора спектра (вычислителя БПФ), поскольку полоса пропускания приемного тракта будет определяться полосой отдельного канала анализатора спектра.

### Структурная схема цифрового приемника сигналов ЛЧМ-зондирования

Структурная схема цифрового приемника сигналов ЛЧМ зондирования приведена на рис. 1.

С выхода антенны принимаемый ЛЧМ-сигнал поступает на вход полосового фильтра (ПФ) с полосой пропускания 1.5–30.0 МГц. Далее происходит преобразование принимаемого ЛЧМ-сигнала с помощью 14-разрядного АЦП. Принимаемый сигнал в цифровой форме поступает на вход умножителя, на второй вход которого поступает эталонный ЛЧМ-сигнал с выхода синтезатора ЛЧМ-сигнала. Временная синхронизация начала формирования эталонного ЛЧМ-сигнала производится по шкале всемирного координированного времени UTC с помощью приемника GPS/ГЛОНАСС.

После этого полученный сигнал разностной частоты фильтруется с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) с выбираемой полосой пропускания из ряда 2, 3, 4 кГц. Сформированный таким образом сигнал свертки обрабатывается дешифратором ионограмм, который состоит из вычислителя БПФ, блока очистки от помех, разделителя треков мод распространения и разделителя лучей. На выходе дешифратора ионограмм формируются ионограммы следующих типов:

- ионограмма с разделением на треки мод распространения (скачки);
- ионограмма с разделением на лучи.

Основные параметры цифрового приемника сигналов ЛЧМ-зондирования:

- прием сигналов с непрерывной линейной частотной модуляцией с параметрами, приведенными в таблице;

Таблица

Диазоны сканирования по частоте, МГц	Скорость девиации входного ЛЧМ-сигнала, кГц/с
2–16	50, 100, 500
2–30	100, 500

- временная синхронизация от спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС с точностью привязки к источнику точного времени не более 100 мкс;

- односигнальный динамический диапазон не менее 90 дБ (в измерительной полосе частот 2 Гц);

- чувствительность не более 2.4 мкВ (в измерительной полосе частот 2 Гц) при  $U_{вх. max} = 76$  мВ.

### Экспериментальные данные слабонаклонного и наклонного зондирования ионосферы

На радиофизическом полигоне ИСЗФ СО РАН (п. Торы) в мае 2007 г. проводились сравнительные испытания аналогового приемника ЛЧМ-сигналов разработки ИСЗФ СО РАН и макета цифрового приемника ЛЧМ-сигналов разработки ФГУП «ОНИ-ИП», изготовленного по схеме прямого усиления с широкополосным непереключаемым преселектором на входе.

Приемные устройства сравнивались в режиме слабонаклонного зондирования на трассе Усолье–Торы и наклонного зондирования путем приема ЛЧМ-сигнала, передаваемого с Кипра.

В качестве сравнительных характеристик использовались спектрограммы сигнала разностной частоты без какой-либо дополнительной обработки.

Сравнительные спектрограммы, полученные при слабонаклонном ЛЧМ-зондировании ионосферы, приведены на рис. 2 и 3, а спектрограммы, полученные при наклонном зондировании, – на рис. 4 и 5.

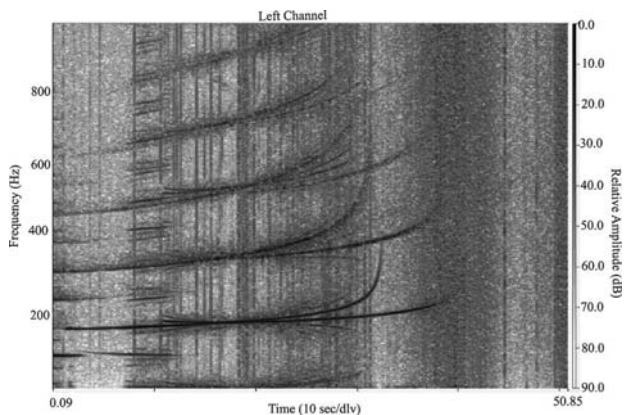


Рис. 2. Спектрограмма слабонаклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы, полученная с помощью аналогового ЛЧМ-приемника ИСЗФ СО РАН на радиофизическом полигоне ИСЗФ СО РАН. Радиотрасса Усолье–Торы.

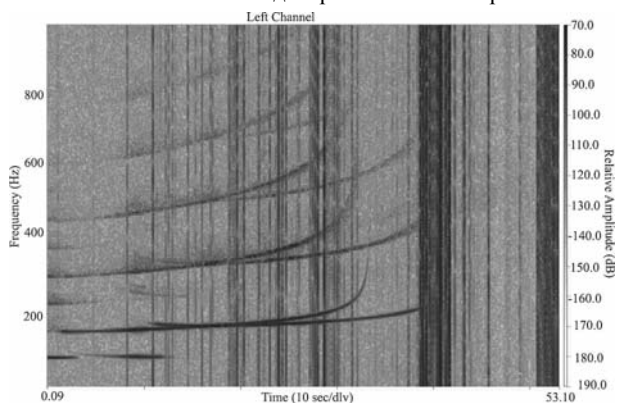


Рис. 3. Спектрограмма слабонаклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы, полученная с помощью макета цифрового ЛЧМ-приемника ФГУП «ОНИИП» на радиофизическом полигоне ИСЗФ СО РАН. Радиотрасса Усолье–Торы.

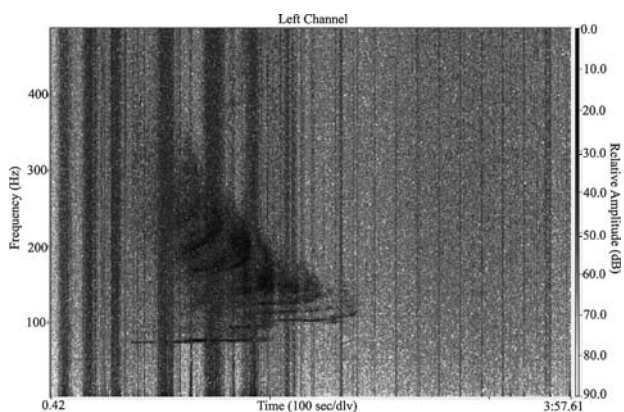


Рис. 4. Спектрограмма наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы, полученная с помощью аналогового ЛЧМ-приемника ИСЗФ СО РАН на радиофизическом полигоне ИСЗФ СО РАН. Радиотрасса Кипр–Торы.

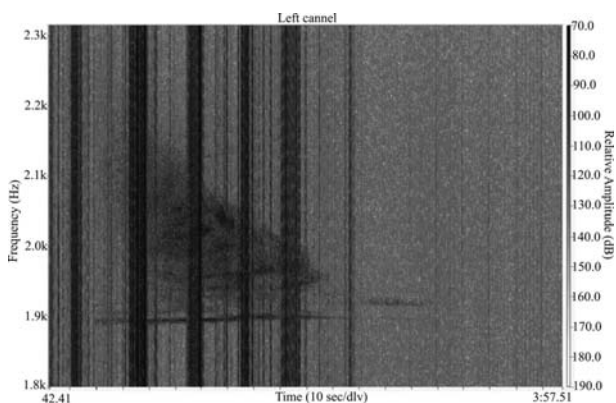


Рис. 5. Спектрограмма наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы полученная с помощью макета цифрового ЛЧМ-приемника ФГУП «ОНИИП» на радиофизическом полигоне ИСЗФ СО РАН. Радиотрасса Кипр–Торы.

### Заключение

1. Предложен способ построения цифрового приемника ЛЧМ-сигналов по схеме прямого усиления с широкополосным неперестраиваемым преселектором на входе.

2. Приведены сравнительные спектрограммы ЛЧМ-зондирования ионосферы, которые были получены с помощью аналогового приемника ЛЧМ-сигналов ИСЗФ СО РАН и макета цифрового приемника ЛЧМ-сигналов ФГУП «ОНИИП».

3. Сравнительные спектрограммы показывают, что предложенная схема цифрового приемника ЛЧМ-сигналов полностью работоспособна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. Основы радиотехнических систем ДКМ-диапазона: Учебное пособие / Под общей ред. проф. В.А. Иванова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. 204 с.
2. Головин О.В. Профессиональные радиоприемные устройства дециметрового диапазона. М.: Радио и связь, 1985. 288 с.
3. Микросхемы АЦП и ЦАП. М.: Издательский дом «Додэка-XXI». 2005. 432 с.
4. Шахнович И. Российский цифровой приемник 1288ХК1Т – первый представитель серии мультифлекс // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 2.
5. Сосновский Н.С. Некоторые вопросы построения устройств цифровой обработки сигналов КВ-диапазона // Омский НИИ приборостроения. «Техника радиосвязи». 1998. Вып. 4. С. 27–44.
6. Побережский Е.С. Цифровые радиоприемные устройства. М.: Радио и связь. 1986.
7. Побережский Е.С. Цифровая обработка сигналов и некоторые проблемы построения КВ-приемников с цифровым гетеродином. 1974. 16 с. (депонированная рукопись).

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск