

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.11>

УДК: 551.463.621.391

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЭХОЛОТ-ПРОФИЛОГРАФ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

В. И. Каевецер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141120, г. Фрязино, пл. Введенского 1

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2021 г.

Аннотация. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец параметрического эхолота-профилографа с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) зондирующего сигнала. Излучаются два ЛЧМ сигнала на частотах 144 кГц и 148 кГц. Разностные частоты приема имеют полосу частот от 1 кГц до 8 кГц. Широкая полоса разностных частот достигается благодаря использованию двух излучаемых ЛЧМ сигналов. Проведены лабораторные и морские испытания экспериментального образца эхолота-профилографа.

Ключевые слова: параметрический эхолот-профилограф, сигналы с линейной частотной модуляцией, стратификация морских осадков.

Abstract. At the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS an experimental prototype of a parametric echo sounder-profiler with linear frequency modulation (LFM) of the sounding signal has been developed, manufactured and tested. Two chirp signals are emitted at frequencies of 144 kHz and 148 kHz. The difference reception frequencies have a frequency range of 1 kHz to 8 kHz. A wide band of differential frequencies is achieved by emitting two chirp signals. Laboratory and marine tests of the experimental model of the echo sounder-profiler have been carried out.

Key words: parametric echo sounder-profiler, signals with linear frequency modulation, stratification of marine sediments.

Введение.

Современные системы акустического профилирования являются одним из главных средств анализа структуры морского грунта для обеспечения геологических, инженерно-технических работ, безопасности судоходства и поиска объектов на морском дне. В связи с этим актуальной является задача определения структуры морского грунта (стратификация) по данным профилирования. Эта задача решается как путем совершенствования технических характеристик аппаратуры мониторинга донного грунта, так и методов обработки результатов измерений, направленных на увеличение точности и достоверности дистанционной классификации донных отложений. Одним из перспективных методов повышения технических характеристик является применение параметрических эхолотов-профилографов, которые по сравнению с линейными обладают рядом преимуществ [1, 2].

Применение ЛЧМ зондирующих сигналов в параметрическом эхолоте-профилографе повышает его технические характеристики. Ожидаемые, при этом преимущества, это увеличение энергетического потенциала в сотни и тысячи раз за счет большой базы сигнала и, соответственно, возможность компенсации потерь параметрической антенны, связанных с низким коэффициентом полезного действия [1, 2]. При этом для того, чтобы сохранить все преимущества параметрического формирования низкочастотных сигналов, необходимо обеспечить нелинейное взаимодействие сигналов накачки и сохранение фазовой структуры разностного ЛЧМ сигнала. Первое требование связано с необходимостью подачи на антенну сигналов накачки достаточно высокой мощности на всей длительности ЛЧМ сигналов, длительность которых превышает длительность стандартного тонального импульса в сотни и тысячи раз. Второе требование связано с необходимостью сохранения когерентности при нелинейных процессах параметрических преобразований для получения низкочастотного разностного ЛЧМ сигнала с заданными характеристиками, практически не отличающимися от математической модели.

1. Структурная схема и технические характеристики параметрического эхолота-профилографа.

Увеличение точности классификации донных отложений требует увеличения разрешающей способности по дальности профилографа. Для увеличения разрешающей способности профилографа необходимо увеличение ширины полосы излучаемого сигнала. Основное ограничение на ширину полосы излучаемого сигнала накладывают приемные и передающие антенны. Рассмотренный в [3, 4] вариант низкочастотного линейного эхолота-профилографа, имеет ширину полосы пропускания антенного тракта 4 кГц при центральной частоте излучения 5 кГц, что соответствует разрешению по дальности 20 см. Ширина диаграммы направленности составляет порядка 60 градусов. Дальнейшее расширение полосы частот зондирующего сигнала и увеличение направленности антенны представляет сложную техническую проблему. В параметрической системе эти проблемы успешно решаются, поскольку направленность определяется высокочастотными антеннами накачки, и составляет 3 градуса при небольших габаритах. Кроме того, полосы частот эффективного излучения у этих антенн достаточно велики (10% от несущей частоты в диапазоне 140 кГц).

Можно дополнительно расширить спектр зондирующего сигнала разностной частоты, применив в каждой антенне сигнал с линейной частотно модуляцией, с разным знаком девиации частоты. В соответствии с частотными характеристиками излучающих антенн накачки, выбираем:

1. Излучаемый сигнал антенны №1 – импульсный, с линейной частотной модуляцией, с изменением частоты от 144.5 кГц до 141 кГц.

2. Излучаемый сигнал антенны №2 – импульсный, с линейной частотной модуляцией, с изменением частоты от 145.5 кГц до 149 кГц.

В результате нелинейного эффекта получится разностный сигнал с линейной частотной модуляцией и девиацией частоты 7 кГц (от 1 кГц до 8 кГц), что позволяет получить разрешение по дальности 10.7 см. и увеличить глубину

зондирования за счет излучения сигнала в низкой части частотного диапазона 1–4 кГц.

На рис. 1 изображена структурная схема разработанного экспериментального образца параметрического профилографа.

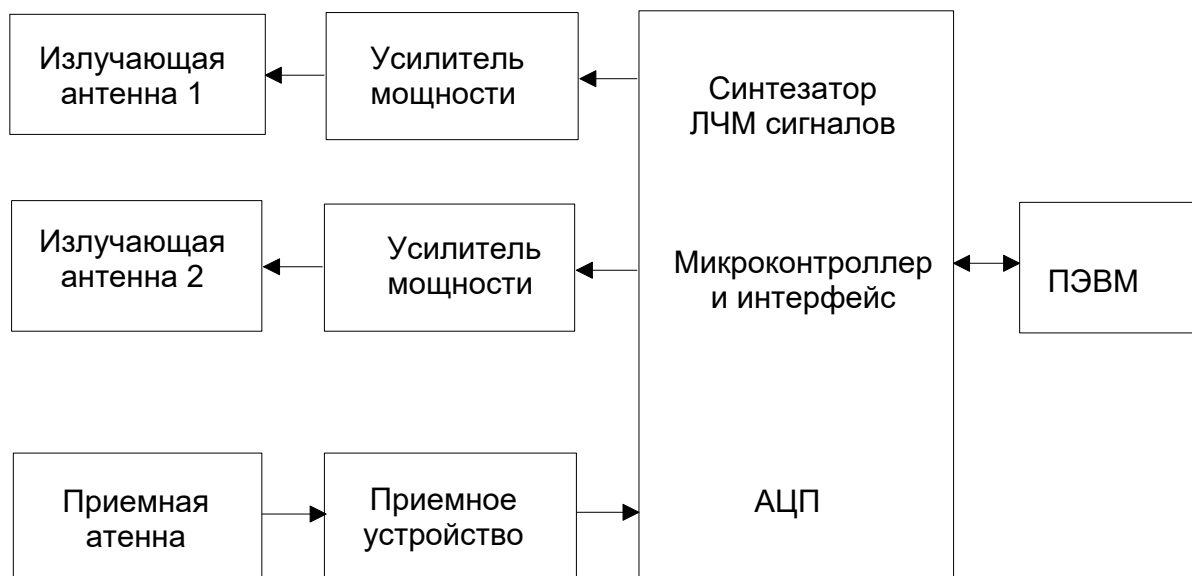


Рис. 1. Структурная схема экспериментального образца параметрического эхолота-профилографа.

В состав параметрического профилографа входит:

1. Излучающая антенна 1.
2. Излучающая антенна 2.
3. Два усилителя мощности, предназначенные для усиления ЛЧМ сигналов, поступающих на них с синтезатора зондирующих.
4. Приемная антенна принимает разностный сигнал, отраженный от грунта. Разностный сигнал формируется в результате нелинейного взаимодействия в воде двух ЛЧМ зондирующих сигналов.
5. Приемное устройство, предназначенное для усиления и фильтрации разностного сигнала, поступающего с приемной антенны. Приемное устройство построено по схеме прямого усиления и имеет общий коэффициент усиления 100000 с диапазоном регулировки усиления 40 дБ. Фильтрация сигнала осуществляется на частотах 1 – 8 кГц.
6. Управляющий микроконтроллер управляет синтезатором зондирующих и опорных сигналов, аналого-цифровым преобразователем (АЦП), интерфейсом

ввода данных в персональную электронную вычислительную машину (ПЭВМ) и принимает команды от ПЭВМ [4]. Синтезатор вырабатывает ЛЧМ зондирующие сигналы для излучающих антенн и тактовые импульсы для АЦП, обеспечивая тем самым когерентную (от строки к строке) оцифровку принимаемого сигнала. АЦП и устройство ввода в компьютер предназначены для оцифровки усиленного сигнала и преобразования его для ввода в компьютер по интерфейсу Ethernet и протоколу UDP.

7. ПЭВМ предназначена для архивации данных, поступающих от АЦП, контроля, управления всем прибором, обработки и отображения информации и работает под управлением программы [5].

Блок антенн параметрического эхолота-профилографа, разработанного и изготовленного в Технологическом Институте Южного Федерального Университете г. Таганрог (ТТИ ЮФУ), показан на рис. 2.

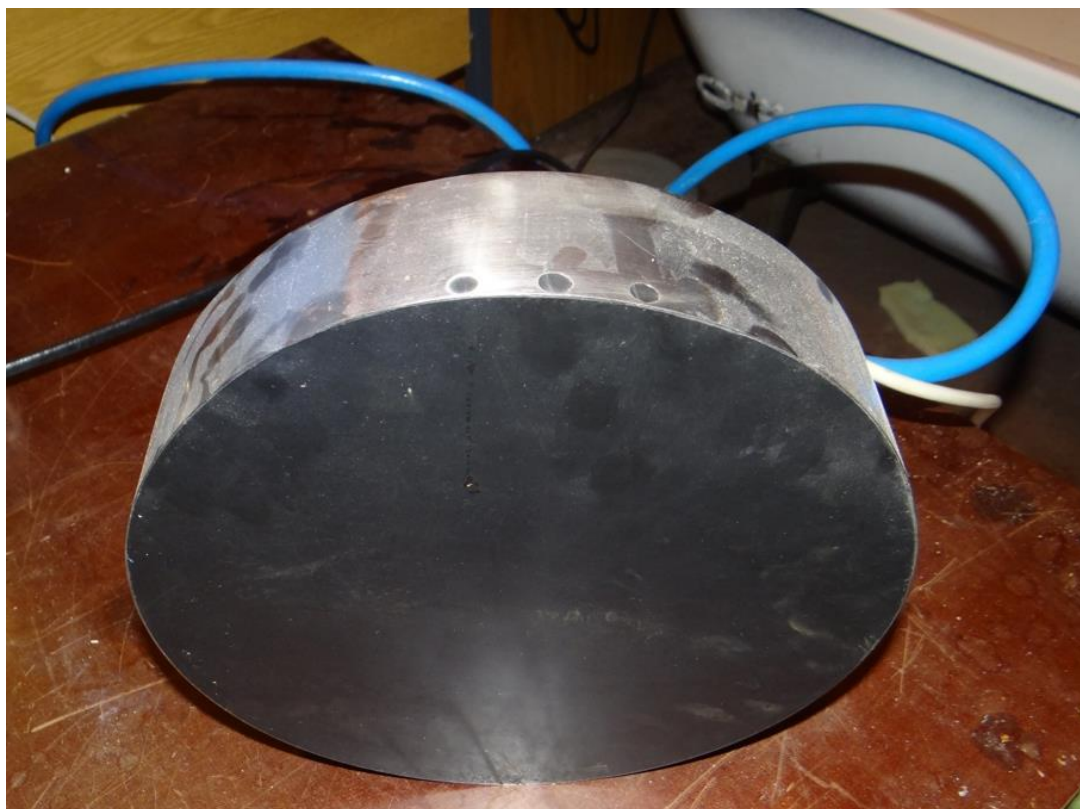


Рис. 2. Блок антенн параметрического эхолота-профилографа.

Технические характеристики параметрического эхолота-профилографа с ЛЧМ сигналом:

1. Рабочие частоты излучения 144.5 кГц – 141 кГц и 145.5 кГц – 149 кГц.

2. Тип излучаемого сигнала – импульсный с линейной частотной модуляцией.
3. Диапазон частот приема – от 1 кГц до 8 кГц.
4. Система отображения и регистрации – персональный компьютер.
5. Излучаемая мощность – 3 кВт для каждого высокочастотного канала.
6. Ширина диаграммы направленности излучающих антенн 3 градуса.

2. Испытания параметрического эхолота-профилографа.

На первом этапе параметрический профилограф был испытан в лабораторных условиях с целью проверки устойчивости работы и правильности формирования низкочастотного сигнала. Для испытаний использовался бассейн, заполненный водой, в который был помещен акустический преобразователь параметрического излучения и отдельная широкополосная приемная антенна.

После подачи на преобразователь сигналов накачки, на слух было установлено наличие низкочастотной составляющей излучения. Сигналы с широкополосной приемной антенны поступают на приемник, оцифровываются и после корреляционной обработки выводятся на устройство отображения. В этом эксперименте проверялась работоспособность профилографа в реальном режиме работы, поскольку все системы формирования сигналов, излучения сигналов накачки, приема и обработки параметрического излучения осуществлялись в штатном режиме. На рис. 3 показан результат корреляционной свертки эхосигналов с теоретической моделью зондирующей посылки длительностью 0.004 сек и девиацией частоты 1 – 8 кГц. Красной линией показана свертка при расстоянии между параметрическим излучателем и гидрофоном 30 см, зеленой – соответственно – 70 см. Первый красный (зеленый) пик соответствует мощности принятого гидрофоном прямого сигнала, излученного параметрической антенной и преобразованного параметрической антенной в низкочастотный диапазон. Далее пики соответствуют эхосигналам, отраженным от стенок бассейна и возможно интерференции между отражениями. Следует отметить, что ширина первого красного пика по уровню

0.7 составляет около 10 см, что соответствует ожидаемой девиации параметрического излучения около 7 кГц.

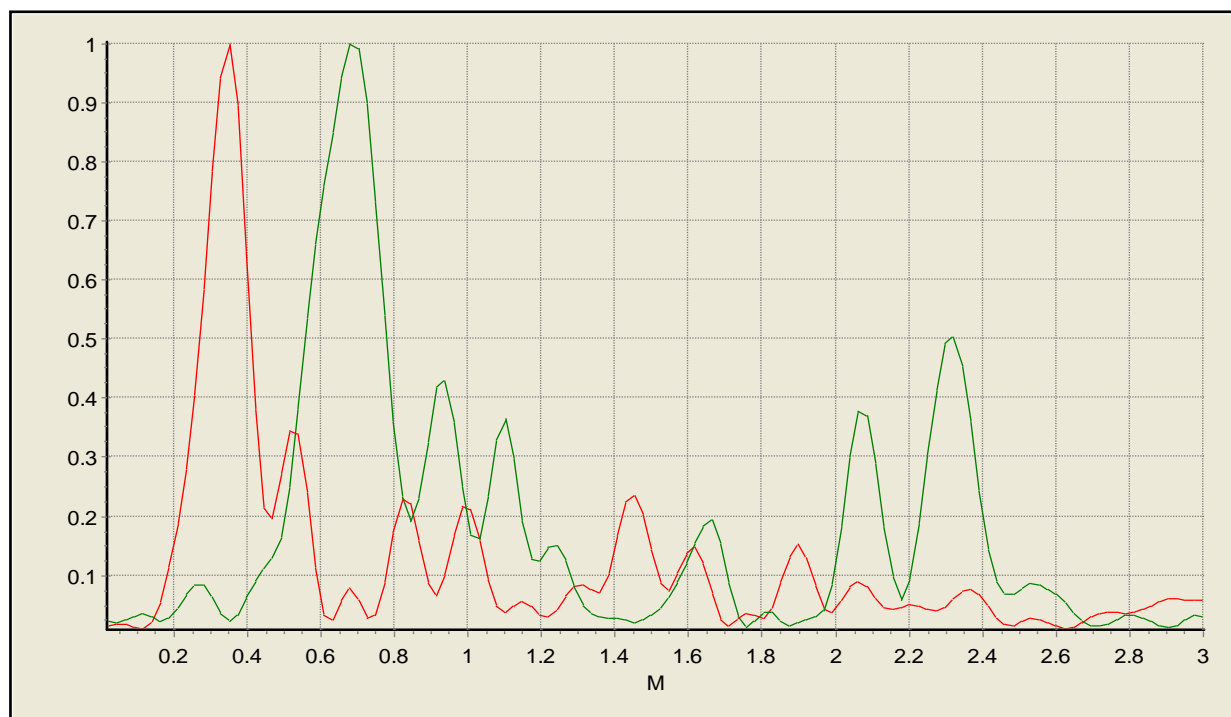


Рис. 3. Нормированная мощность принимаемого сигнала (корреляционная свертка с моделью).

Морские испытания параметрического профилографа проходили в Финском заливе Балтийского моря. На рис. 4 приведена эхограмма сигнала принятого на приемную антенну параметрического эхолота-профилографа на разностной частоте. На рисунке цифрой 1 отмечена поверхность дна, цифрой 2 – граница верхнего слоя донных отражений и цифрой 3 – кратное отражение от поверхности дна. Глубина поверхности дна на участке съемки около 3.2 м. Волнистая структура эхограммы в районе линии дна повторяет изменения глубины и связана с проявлением боковых лепестков автокорреляционной функции ЛЧМ сигнала, что подтверждает высокую энергетику низкочастотного сигнала эхолота-профилографа. Хорошо виден слой донных отражений мощностью около 80 см. По слабому коэффициенту отражения и слоистой структуре это, по-видимому, илистые отложения.

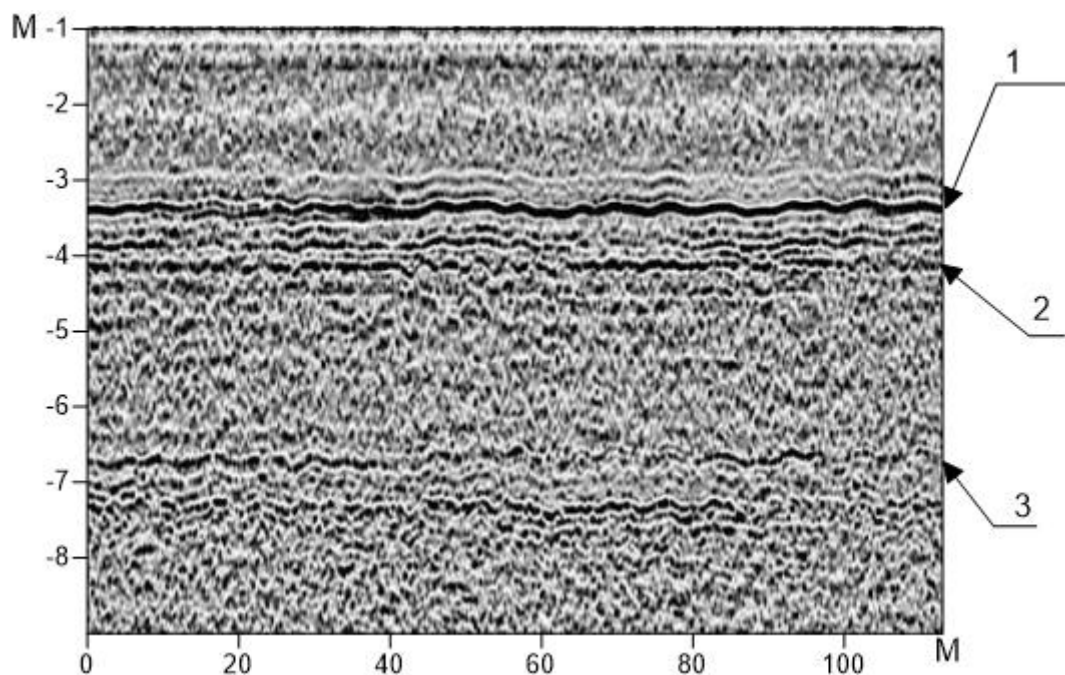


Рис. 4. Эхограмма сигнала, принятого на широкополосную приемную антенну на разностной частоте.

Заключение.

Разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец параметрического эхолота-профилографа. Проведенные измерения подтвердили правильную работу параметрического профилографа в части формирования разностного ЛЧМ сигнала на низкой частоте, соответствующий по ширине полосы частот теоретической модели. Морские испытания подтвердили высокую энергетику низкочастотного сигнала эхолота-профилографа, что позволяет проводить стратификацию донных отложений.

Финансирование.

Работа выполнена в рамках Государственного задания.

Литература

1. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов В.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. *Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана*. Ростов-на-Дону, Ростиздат. 2007. 448 с.
2. Кузнецов В.П. *Нелинейная акустика в океанологии*. Москва, ФИЗМАТЛИТ. 2010. 264 с.

3. Каевицер В.И., Разманов В.М., Долотов С.А. Акустическая локация морских осадков когерентными ЛЧМ сигналами. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2009. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep09/3/text.pdf>
4. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны арктических морей. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2016. №11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf>
5. Патент RU 124503. Элбакидзе А.В., Смольянинов И.В. *Устройство для ввода и когерентной обработки сигнала*. Опубликовано 27.01.2013.
6. Патент RU 2017664345. Элбакидзе А.В. *Программа управления и регистрации данных многофункциональной гидролокационной аппаратуры в реальном времени*. Опубликовано 27.12.2017.

Для цитирования:

Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Параметрический эхолот-профилограф с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.11>