

**М.П. Иванов¹, Ю.А. Толмачев¹, Н.А. Данилов²,
Б.Ю. Красницкий³, В.Е. Стефанов¹**

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИНТЕЗА КОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЕЛЬФИНОВ

*¹Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9,
Тел.: 8(911)9425478. E-mail: 20mivanov@mail.ru*

*²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения, Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая
Морская, 67, лит. А, Тел: +7(905)264-7933, E-mail: dan_nick@mail.ru*

*³ФГБУН «Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского –
природный заповедник РАН», Россия, 298188 Республика Крым,
г. Феодосия, пгт. Курортное, ул. Науки, 24, Тел: +7-36562-26-512,
E-mail: karadag1914@mail.ru*

Рассмотрена возможность технической реализации синтеза сигналов коммуникации дельфинов с помощью антенны на основе дискретных широкополосных элементов с резонансными частотами 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 кГц. Такой набор позволяет формировать пакеты ультракоротких биполярных импульсов (УКИ) с различной частотной окраской. При использовании двух дополнительных излучателей импульсов длительностью, соизмеримой с длительностью пакетов, реализуется излучение ЧМ сигналов.

Ключевые слова: пакеты ультракоротких импульсы, составные сигналы дельфинов, длинные частотно-модулированные сигналы, идентификация объекта

На основании анализа результатов акустических записей, полученных для дельфина белуха в эксперименте с видео и акустической обратной связью, идентифицирован основной набор сигналов эхолокации и коммуникации [1]. Коммуникационные сигналы зарегистрированы с помощью трехканальной системы и состоят из сложных составных сигналов: сверхширокополосных простых ультракоротких импульсов (УКИ) с времяимпульсной модуляцией (ВИМ), длинных импульсов со слабо выраженной частотной модуляцией несущей (ЧМ1) и с ярко выраженной модуляцией несущей (ЧМ2). Фазо-импульсная (ФИМ), широтно-импульсная (ШИМ) и частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) являются разновидностью ВИМ. Ширина полосы частот такого сигнала

ла определяется минимальной длительностью биполярного импульса $\Delta f \approx 1/\tau_{\min}$, при этом информация передается *модуляцией скважности импульсов и модуляцией ширины спектра от импульса к импульсу*. Некоторым техническим приближением к таким импульсам служат сигналы с OFDM модуляцией (Orthogonal frequency division multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов [2].

Точная идентификация полученных сигналов ограничивается в настоящее время зарегистрированным набором. К коммуникационным будем относить следующие пакеты УКИ:

- с модуляцией скважности при фиксированной частоте повторения от 0.01 до 1 кГц, спектром в диапазоне от 1 до 500 кГц и количеством импульсов в пакете от 5 до 20;
- с модуляцией скважности, с частотой повторения от 100 до 250 Гц, полосой частот от 1 до 550 кГц, количеством импульсов от 20 до 130 и длинным ЧМ импульсом с фиксированной частотой от 2 до 10 кГц (пакет 2, 3, 5, 10 рис. 1б), с частотной характеристикой от 1 до 500 кГц;
- с модуляцией скважности от 0.1 до 1 кГц и количеством импульсов в пакете от 20 до 55, с полосой частот УКИ от 40 до 600 кГц (пакеты 1,4,7,8 рис. 1б).

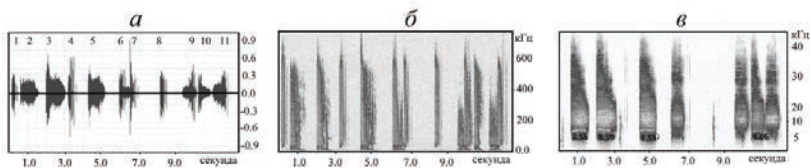


Рис. 1. Коммуникационные пакеты УКИ.

Пакеты 6 и 7 (рис. 1а) связаны между собой последовательностью импульсов, имеющих полосу частот уже, чем спектры самих пакетов, что хорошо видно на рис. 1б. В серии зарегистрированных сигналов дельфина есть также пакеты с параметрами каждого импульса в пакете близкими к волновой дельта-функции с низкочастотной составляющей равной нулю. Осциллограмма одного из УКИ последовательности, показанной на рис. 1а, приведена на рис. 2а, а его спектральная плотность мощности – на рис. 2б.

В некоторых случаях пакеты состоят из последовательностей импульсов, у которых спектральные характеристики смещены относительно нуля в высокочастотную область на 20, 50 или 100 кГц, что изменяет не только спектральные параметры импульса, но и добавляет во вре-

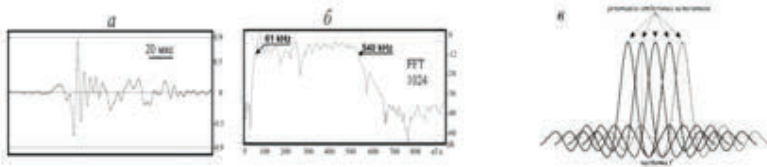


Рис. 2. Осциллограмма и спектральная плотность мощности одного из УКИ.

менные параметры дополнительные колебательные процессы с быстрой частотной модуляцией (рис. 2б). При исследовании сигналов дельфина самое главное – правильно представить весь излучаемый пакет и выделить его границы с помощью пауз. Для анализа всего излученного и зарегистрированного акустического ряда необходимо использовать дополнительный алгоритм, очищающий последовательность пакетов от шума и помех, создаваемых другими дельфинами.

Разрабатываемая модель формирования OFDM сигнала основана на множестве источников излучения, и в нашем случае это не узкополосные сигналы, а источники широкополосных импульсов, необходимых для синтеза сверхширокополосного импульса, подобного рис. 2а. Предлагаемая модель (рис. 2в) может быть использована для построения импульсов с различными спектрально-временными параметрами в различных частотных диапазонах. Она пока не имеет доказательной экспериментальной базы, но вполне может быть реализована как для дальнейших исследований слуховой системы дельфина, так и для синтеза пакетов из УКИ, соответствующих сигналам коммуникации. При использовании волновых дельта-импульсов с ВИМ возможно создание сложных составных сигналов в форме последовательности пакетов импульсов. Как известно, спектрально-временные параметры излучаемых дельфином сигналов эхолокации зависят от угла наблюдения, причем так, что одинаковых сигналов от одного импульса, излученного животным, по пространству наблюдения не существует. Предполагается, что сигналы коммуникации обладают аналогичным свойством, но пока доказать это затруднительно, т.к. известные методики вербального взаимодействия дельфинов основаны на регистрации сигналов подвижных животных.

Создание излучающей антенны на дискретных широкополосных резонансных элементах с центральными частотами на 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 кГц может обеспечить практически весь известный частотный диапазон формирования сигналов дельфина на УКИ с ВИМ. При генерации пар связанных пакетов волновых дельта-импульсов с ЧМ общая длительность пары определяется длительностью квазипериоди-

ческой импульсной последовательности. Центральная частота первого пакета задается значением тактовой частоты синхронизации формирования пакетов УКИ и дискретными значениями модуляции ВИМ. С точки зрения биолога, полученный длинный квазимонохроматический сигнал будет задавать адрес, определяющий назначение данного пакета для постороннего наблюдателя, что данный пакет является сигналом коммуникации. С точки зрения инженера, – это сигнал синхронизации всех событий, формируемых в данном пакете. Второй, связанный с первым, пакет – частотно-модулированный длинный импульс – определяет адрес получателя или имя животного, которому направлено данное послание. Далее формируется пакет любой сложности из волновых дельта-импульсов (ВДМ). Одновременное или последовательное излучение ВДМ обеспечивает наличие нескольких степеней свободы, используя которые можно синтезировать любой импульс, аналогичный создаваемому дельфином. Создание скоростного модема для передачи данных от различных подводных устройств в дуплексном режиме связи для скрытной и помехозащищенной передачи данных описано в [3]. Возможность применения различных схем модуляции в OFDM сигнале в каждом канале с условной поднесущей, позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации. Близкое по идеям устройство «Говорящий дельфин» было разработано и испытано в диапазоне частот от 6 кГц до 170 кГц с разбросом частотной характеристики не более 16 дБ. [4]. Представленная модель коммуникационного сигнала на основе OFDM не использует непрерывные функции.

Литература

1. Иванов М.П., Бибииков Н.Г., Данилов П.А., Соколов П.А., Романов Б.В., Красницкий Б.Ю., Стефанов В.Е. Сравнительная оценка эхолокационных и коммуникационных сигналов дельфина // Ученые записки Физического факультета МГУ. 2020. № 1. 2010903.
2. Leus P., van Walree J. Multiband OFDM for covert acoustic communications // IEEE J. Sel. Area Commun. 2008. Vol. 26. P. 1662–1673.
3. Hijaz and Frost V.S. Exploiting OFDM systems for covert communication // Military Communications Conference. 2010. P. 2149–2155.
4. Yuka Mishima. «Dolphin Speaker» to Enhance Study of Dolphin Vocalizations and Acoustics // Popular Version of Paper 2aAO5; Presented May 15, 2012. ASA Lay Language Papers 163rd Acoustical Society of America Meeting, Hong Kong.

**M.P. Ivanov¹, Y.A. Tolmachev¹, N.A. Danilov²,
B.J. Krasnickij³, V.E. Stefanov¹**

PRELIMINARY ESTIMATION OF THE DOLPHIN COMMUNICATION SIGNALS

¹*St. Petersburg State University,
Universitetskaya nab. 7/9, 199034, St. Petersburg, Russia; Tel.: 8(9119)425478,
E-mail: 20mivanov@mail.ru*

²*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg, 190000, Russia,
E-mail: dan_nick@mail.ru; Tel.: +7(905)264-7933;*

³*“Karadag Scientific Station named after T.I. Vyazemsky - a natural reserve
of the Russian Academy of Sciences”, 298188, Republic Crimea, Feodosia,
Kurortnoye, Crimea, Russia. Nauki ul., 24, Tel.: +73656226212,
E-mail: karadag1914@mail.ru*

The possibility of technical implementation of the Dolphins communication signals synthesis is considered using an antenna based on discrete broadband elements with resonant frequencies 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 kHz. s. When using two additional pulse emitters with a duration comparable to the duration of the packets, FM signals are emitted.

Keywords: ultrashort pulses, dolphin signals, clicking shrimp signals, object identification

References

1. Ivanov M.P., Bibikov N.G., Danilov N.A., Sokolov P.A., Romanov B.V., Krasnickij B.J., and Stefanov V.E. Comparative evaluation of echolocation and communication signals of dolphins. Moscow University Physics Bulletin, 2020, No. 1, 2010903.
2. Leus P. and van Walree J. Multiband OFDM for covert acoustic communications. IEEE J. Sel. Area Commun., 2008, Vol. 26, pp. 1662–1673.
3. Hijaz and Frost V.S. Exploiting OFDM systems for covert communication. Military Communications Conference, 2010, pp. 2149–2155.
4. Yuka Mishima «Dolphin Speaker» to Enhance Study of Dolphin Vocalizations and Acoustics. Popular Version of Paper 2aAO5; Presented May 15, 2012; ASA Lay Language Papers 163rd Acoustical Society of America Meeting, Hong Kong.