ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА

П.В. Русин, В.И. Анисимов, В.А. Крымовский

*Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия
Вооруженных Сил Российской Федерации», Москва, Российская Федерация*

Рассмотрена разработка новых средств приведения в действие специальных устройств на больших расстояниях в водной среде в условиях многолучевости распространения сигнала, при которых построение гидроакустического канала управления предполагает обеспечение высоких значений его помехоустойчивости по отношению к непреднамеренным помехам, а также надежности управления применительно к помехам, возникающим при многолучевости распространения гидроакустических волн. Представлены результаты расчета коэффициента помехоустойчивости ГАЛУ при различных видах и структуре сигнала, а также результаты моделирования работы с одно- и двухканальной ГАЛУ с ОФМ сигналом при воздействии помехи типа «белый» шум и наложении на прямой сигнал отраженного луча.

Ключевые слова: гидроакустика, многолучевость, помехоустойчивость, относительная фазовая манипуляция, двухканальная ГАЛУ, «белый» шум.

JUSTIFICATION OF CONSTRUCTION OF THE HYDROACOUSTIC CONTROL CHANNEL IN CONDITIONS OF MULTI-FREQUENCY SIGNAL DISTRIBUTION

P.V. Rusin, V.I. Anisimov, V.A. Krymovskiy

*Military Educational Research Center of Ground Forces "Combined Arms Military Academy
of Armed Forces of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation*

The report discusses the development of new means of actuating special devices at long distances in the aqueous medium under conditions of multipath signal propagation. The construction of a hydroacoustic control channel in conditions of multipath signal propagation involves providing high values of noise immunity of the channel in relation to unintended noise, as well as the reliability of control in relation to noise arising from multipath propagation of hydroacoustic waves. The results of calculating the GALU noise immunity coefficient for various types and structure of the signal are presented, as well as the results of modeling work with a single and two-channel GALU with a DPM signal when exposed to white noise and superimposed on a direct signal of the reflected beam.

Keywords: hydroacoustics, multipath, interference immunity, the relative phase shift keying, dual channel HACC, "white" noise.

По взглядам военных специалистов, особенностями ведения современных боевых действий является широкомасштабное использование высокоточного оружия, в том числе для поражения критически важных объектов, которое будет носить избирательный, точечный характер [1].

В военной доктрине Российской Федерации, в качестве основной задачи строительства и развития Вооруженных Сил, отмечается необходимость их оснащенности современными (перспективными) образцами вооружения, военной и специальной техники в соответствии с прогнозируемыми военными угрозами [2].

При ведении боевых действий в прибрежных районах, важными объектами поражения могут быть причальные и гидротехнические сооружения портов, нефтеналивные терминалы,

базы подводных лодок и т. д. Поэтому разработка новых средств приведения в действие специальных устройств на больших расстояниях в водной среде является актуальной задачей.

В работе [3] обосновано, что эту задачу целесообразно решать с использованием гидроакустического канала передачи информации. Построение гидроакустического канала управления на больших расстояниях в условиях многолучевости распространения сигнала предполагает обеспечение высоких значений помехоустойчивости канала, по отношению к непреднамеренным помехам, а также надежности управления применительно помехам, возникающим при многолучевости распространения гидроакустических волн.

Реализация помехоустойчивой гидроакустической линии управления (ГАЛУ) предполагает обоснование рациональной структуры сигнала управления, которая включает выбор вида модуляции, вида кодирования и кодового признака. Применение многочастотного кодирования не целесообразно из-за того, что пропуск в условиях помех даже одного элемента сигнала будет соответствовать пропуску команды управления, а при двоичном кодировании допускается наличие расчетного количества ошибок из условия имитостойчивости. С точки зрения максимально высокой помехоустойчивости предполагается использование сигналов с фазовой манипуляцией (ФМ). Однако обработка таких сигналов на приемной стороне требует когерентного приема, что на практике вызывает определенные трудности.

Сигналы с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) уступают сигналам ФМ по помехоустойчивости на 3 дБ, но отличаются простотой практической реализации. По сравнению с частотно-манипулированными (ЧМ) сигналами, где для передачи сигнала управления используется два частотных канала, использование ОФМ сигналов отличается более рациональным использованием частотного ресурса. Кроме того, при прочих равных условиях, ЧМ сигналы на 3 дБ проигрывают по помехоустойчивости ОФМ сигналам.

Если с точки зрения помехоустойчивости ГАЛУ по отношению к непреднамеренным гидроакустическим помехам целесообразно использовать сигналы с относительной фазовой манипуляцией, то для борьбы с многолучевостью распространения гидроакустических волн (например, в мелком море) рациональный вариант необходимо обосновать.

Механизм воздействия помехи на полезный сигнал при многолучевости заключается в том, что отраженный от дна или от водной поверхности сигнал, задержанный во времени, с различными потерями амплитуды при отражении, попадает на вход приемника ГАЛУ и накладывается на полезный сигнал прямого луча. При этом, в зависимости от соотношения фаз и амплитуд прямого и задержанного сигналов, вероятность правильного приема команды управления может существенно меняться. В качестве мер борьбы с этим явлением могут использоваться широкополосные сигналы и многоканальная передача сигналов.

При передаче сигнала в морской воде необходимо учитывать скорость распространения звука, которая составляет примерно 1500 м/с. В этом случае задержка сигнала при распространении, например, на дальности 10 км будет составлять 6,7 с. При этом нет смысла использовать короткие сигналы управления, так как срабатывание исполнительного прибора (ИП) ГАЛУ произойдет только спустя суммы времени задержки и длительности сигнала. Но и использование сигналов управления соизмеримых с временем задержки приведет к увеличению времени до срабатывания ИП до удвоенного времени задержки. Поэтому для реализации высокой помехоустойчивости ГАЛУ целесообразно использовать сигналы управления достаточно большой длительности, около трех секунд [3]. Количество элементов в команде управления выбирается исходя из требований, аналогичных предъявляемым к радиолиниям управления инженерными боеприпасами, по имитостойчивости, имитозащищенности и трансформации команд управления.

При выполнении этих требований, что проверялось расчетом соответствующих вероятностей ложных срабатываний [4], критерием сравнения различных мер борьбы с многолучевостью выбран коэффициент помехоустойчивости $K_{пу}$. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Помехоустойчивость ГАЛУ при различных видах и структуре сигнала

№ n/n	Вид сигнала	Структура сигнала	Полоса фильтра, Δf_z , Гц	Длительность команды, T_k , с	Коэффициент помехоустойчивости, $K_{пу}$
1	ОФМ 1 кан. УПС	160 эл.	50	3,17	4,5
2	ОФМ 2 кан. УПС	160 эл.	50	3,17	4,85
3	ОФМ 1 кан. ШПС	64x16	325	2,28	2,6
4	ЧМ 1 кан. ШПС	16 x 60	350	3,072	2,15
5	2-канальная ЧМ ШПС	2x16x30	350	3,072	1,67

Помехоустойчивость одно- и двухканальной ГАЛУ при работе узкополосными сигналами с ОФМ модуляцией в условиях «белого» шума отличается незначительно (отличие около 7 %). График характеристики помехоустойчивости одноканальной ГАЛУ с ОФМ сигналом приведен на рис. 1.

Рис. 1. Результаты моделирования работы одноканальной ГАЛУ с ОФМ сигналом при воздействии помехи типа «белый» шум (п.1 табл. 1)

Рис. 2. Результаты моделирования работы двухканальной ГАЛУ с ОФМ сигналом при воздействии помехи типа «белый» шум и наложения на прямой сигнал отраженного луча (п. 2 табл. 1)

Моделирование работы двухканальной ГАЛУ с ОФМ сигналами, функционирующей в условиях «белого» шума с обработкой прямого луча и с наложением на него отраженного и задержанного сигнала, показало результаты, представленные на рис. 2.

Как видно из графика рис. 2, вероятность правильного приема $P_{пр} = 0,5$ ГАЛУ при двухлучевом канале обеспечивается при гораздо большем отношении п/с, чем в однолуче-

вом канале, что объясняется независимостью каналов, разными условиями ослабления и задержки сигнала при отражении (отношение п/с возрастает примерно на 20 %).

В диапазоне частот 3–500 кГц для оценки ослабления сигнала используется эмпирическая формула Марша и Шулкина [4]

$$F(f, p, T)_{[дБ/км]} = 8,68 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{S \cdot A \cdot f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{B \cdot f^2}{f_T} \right) \cdot (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} \cdot P_{z/cm}), \quad (1)$$

где $A = 2,34 \cdot 10^{-6}$, $B = 3,38 \cdot 10^{-6}$, S – соленость воды, ‰; f – частота звука, кГц;

$P_{[кг/см^2]} = \left(1 + \frac{h}{10}\right) \cdot 1,02$ – гидростатическое давление [1]; h – глубина, м; T – температура, °С.

f_T кГц = $21,9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)}$ – частота релаксации, (2)

Ослабление сигнала в мелком море зависит от множества факторов:

- состояния поверхности моря,
- характеристик водной среды,
- отражающих и поглощающих свойств дна.

В зависимости от значения параметра $H[км] = 0,58\sqrt{2h(м)}$, где h – глубина моря, ослабление в мелком море может вычисляться по формулам

А) $R < H$, то $F_{ослМ} = F_{осл} \cdot R + 20 \lg R - K_L, дБ;$ (3)

Б) $H < R < 8H$, то $F_{ослМ} = F_{осл} \cdot R + 15 \lg R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 5 \lg H - K_L, дБ;$ (4)

В) $R > 8H$, то $F_{ослМ} = F_{осл} \cdot R + 10 \lg R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 10 \lg H - K_L + 4,5, дБ$ (5)

Значения коэффициентов α_T , K_L в зависимости от типа дна, волнения моря, а также спектральная плотность шумов моря в полосе 1 кГц приведены в табл. 2 [4].

Таблица 2

**Параметры мелкого моря и уровни помех,
влияющие на ослабление сигнала и надежность управления ГАЛУ**

Волнение моря	Значение a_m		Значение K_L		Z_n дБ/мкПа/1 кГц	$K_{отр}$
	песок	ил	песок	ил		
0 баллов	4	5,9	3,9	3,4	58	0,94
1 балл	4,5	6,8	33,1	2,6	65	0,63
2 балла	4,8	7,2	2,7	2,2	71	0,41
3 балла	5	7,5	2,4	2	76	0,32
4 балла	5,2	7,8	2,2	1,7	78	0,27

Выполненные расчеты для мощности, подводимой к антенне, $P = 5$ Вт, при двухканальной работе ГАЛУ сигналами длительностью $T_c = 3,17$ с при двоичном кодировании с относительной фазовой манипуляцией показали, что обеспечивается дальность управления до 15,7 км при вероятности ложных срабатываний от непреднамеренных помех $P_{л1} \leq 10^{-6}$ за 10 суток работы и надежности управления не менее $P_y = 0,95$ с учетом воздействия на вход приемного устройства ГАЛУ отраженного и задержанного сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеремет И.А. Критические инфраструктуры как сфера противоборства. М.: Федеральная служба по оборонному заказу, 2005.
2. Военная доктрина Российской Федерации 30.12.2014 URL: <https://rg.ru/2015/12/31/nac-bezopasnost-site-dok.html>, свободный (дата обращения: 21.06.2019).
3. Моташенко С.В. Аспекты построения гидроакустической линии управления инженерными боеприпасами: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», 2012. 155 с.
4. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.