

УДК 621.391

А.Г. Голубев, П.А. Молчанов

ОАО «Камчатский гидрофизический институт»

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЛУЧЕВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ТРАНСФОРМАЦИЕЙ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

При передаче данных в многолучевом канале связи, как правило, по реакции канала на испытательный импульс (ИИ) осуществляется предсказание формы каждого принимаемого информационного сигнала (ИС). Во избежание межсимвольной интерференции в последовательности ИИ целесообразна ее передача со скачкообразным изменением несущей частоты. При этом возникает необходимость оценивания импульсной реакции канала в полосе частот ИС по реакции канала на последовательность ИИ, передаваемых в разных диапазонах частот, в общем случае не совпадающих с полосой частот ИС. Настоящая статья посвящена алгоритмам такого оценивания.

МНОГОЛУЧЕВОЙ КАНАЛ, ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС, АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ, ПОГРЕШНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ, ИМПУЛЬСНАЯ РЕАКЦИЯ, КОРРЕЛЯЦИЯ, АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ.

Введение

Большинство каналов связи сравнительно большой протяженности характеризуется многолучевым распространением. Форма передаваемого сигнала при таком распространении искажается случайным образом, что приводит к существенному снижению эффективности когерентной обработки при приеме. В таких случаях применяется, в частности, так называемая «система с испытательным импульсом и предсказанием» (СИИП) [1, 2, 8]. Реализация СИИП предполагает несколько функций:

передачу информационных сигналов (ИС), соответствующих символам передаваемого алфавита;

передачу испытательных импульсов (ИИ), не содержащих информации;

оценивание по ИИ импульсной характеристики канала распространения (ИХК);

предсказание (прогноз) формы каждого из выходных ИС, т. е. ИС на выходе канала связи.

Указанный прогноз каждого из выходных информационных сигналов осуществляется посредством вычисления свертки соответствующего исходного ИС (т. е. сигнала на входе канала связи) с ИХК.

Чтобы обеспечить необходимую точ-

ность оценивания ИХК, испытательные импульсы должны передаваться многократно (непрерывно), однако при этом (особенно в случае их передачи при повторяющейся форме) происходят искажения формируемой оценки ИХК, вызванные эффектом, аналогичным межсимвольной интерференции (МСИ). Последняя имеет место при передаче через многолучевой канал информационных сигналов. Для исключения МСИ необходимо, например, передавать последовательность испытательных импульсов со скачкообразным изменением несущей частоты [3, 9]. При этом для накопления (осреднения) оценок ИХК, сформированных по разным испытательным импульсам (они передаются на разных частотах), необходимо «привести» эти оценки к одному частотному диапазону, а именно к диапазону (либо диапазонам) передачи информационных сигналов. Данная задача никем до нас не рассматривалась.

Настоящая статья посвящена решению указанной задачи, а именно разработке алгоритма оценивания ИХК с трансформацией диапазона частот, в котором по каждому испытательному импульсу формируется оценка ИХК (далее для краткости именуем их алгоритмами трансформации).

Модель многолучевого канала и используемая терминология

Моделями канала с рассеянием по времени могут служить соответствующие четырехполосники с переменными параметрами, характеризующиеся импульсными характеристиками, зависящими от времени [4, 5, 10]. При этом принимаемый сигнал есть свертка переданного сигнала с ИХК. Импульсная характеристика четырехполосника определяется как его реакция на входное воздействие в виде δ -функции; такое определение соответствует ИХК в бесконечной полосе частот. Применительно к многолучевому каналу, по которому передаются сигналы в ограниченной полосе частот, оправдано рассмотрение модели, содержащей в качестве входной цепи узкополосный фильтр, полоса пропускания которого совпадает с частотным диапазоном передаваемого сигнала [4]. Импульсная характеристика такого канала (его узкополосной модели) есть свертка ИХК с импульсной характеристикой указанного полосового фильтра; последняя же практически совпадает с автокорреляционной функцией (АКФ) передаваемого сигнала. Определенную таким образом ИХК будем называть УИХК (импульсная характеристика канала, определенная в узкой полосе частот).

Оценка УИХК в диапазоне частот испытательного импульса $S(n)$ (здесь и далее n — индекс аргумента дискретного времени) вычисляется как свертка принимаемого сигнала с этим импульсом (см., например, работу [3]). Нетрудно установить, что результат оценивания указанной УИХК (с точностью до реализации аддитивного шума) есть свертка ИХК с АКФ испытательного импульса $S(n)$.

Постановка задачи

Задача настоящей статьи — разработка и сравнение алгоритмов пересчета оценки УИХК, полученной в диапазоне частот испытательного импульса $S_1(n)$, в оценку импульсной характеристики этого же канала в диапазоне частот ИС или испытательного импульса $S_2(n)$. Последний передается в полосе частот, не совпадающей с таковой

для сигнала $S_1(n)$.

Эта задача ставится следующим образом. Имеем следующие исходные соотношения:

$$\begin{aligned}\hat{y}_1(n) &= z(n) \otimes S_1(M-n) = \\ &= \text{АКФ}_1(n) \otimes h(n) + N_1(n); \\ \hat{y}_2(n) &= z(n) \otimes S_2(M-n) = \\ &= \text{АКФ}_2(n) \otimes h(n) + N_2(n),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\hat{y}_1(n)$, $\hat{y}_2(n)$ — оценки УИХК1 и УИХК2, которые были бы сформированы в случаях передачи испытательных импульсов $S_1(n)$ и $S_2(n)$ при их взаимно-корреляционной обработке соответственно; $z(n)$ — реализация сигнала на входе приемника; \otimes — операция свертки; $M = f_d \tau$ (f_d , τ — частота дискретизации каждого из результатов оценивания УИХК и длительность каждого из сигналов $S_1(n)$ и $S_2(n)$); $\text{АКФ}_{1,2}(n)$ — АКФ сигналов $S_{1,2}(n)$; $h(n)$ — ИХК; $N_1(n)$, $N_2(n)$ — реализации шума или ошибки оценивания соответствующих УИХК.

Вместо оценки УИХК1 $y_1(n)$ решение задачи может быть также основано непосредственно на анализе наблюдаемой приемником реализации сигнала $z(n)$.

Задана форма каждого из испытательных импульсов $S_{1,2}(n)$, причем вместо одного из них можно рассмотреть и информационный сигнал. Фактически передан испытательный импульс $S_1(n)$, и на основе взаимно-корреляционной обработки этого импульса сформирована оценка УИХК1 $\hat{y}_1(n)$; при этом форма ИХК $h(n)$ неизвестна. Требуется вычислить оценку УИХК2, близкую по форме к той, которая была бы сформирована в случае передачи испытательного импульса $S_2(n)$ на основе его взаимно-корреляционной обработки (это есть оценка $\hat{y}_2(n)$). Другими словами, требуется пересчитать оценку УИХК из диапазона частот испытательного импульса $S_1(n)$ в аналогичную оценку УИХК (того же канала) в диапазоне частот испытательного импульса $S_2(n)$; такую пересчитанную оценку обозначаем как $y_{1 \rightarrow 2}(n)$.

Варианты алгоритма трансформации (пересчета) рабочего диапазона частот

В рамках настоящей работы предлагаются и анализируются три варианта алго-

ритма трансформации рабочего диапазона частот (алгоритмы 1 – 3).

Алгоритм 1. Это алгоритм с промежуточным оцениванием непосредственно ИХК. Согласно этому варианту алгоритма, на основе заданной оценки УИХК1 $y_1(n)$ реализуется прямое вычисление оценки ИХК $\hat{h}(n)$ и далее вычисляется искомая оценка УИХК2 как свертка:

$$\hat{y}_{1 \rightarrow 2}(n) = \text{АКФ}_2(n) \otimes \hat{h}(n). \quad (2)$$

При оценивании ИХК последняя рассматривается как решетчатая функция, представляющая собой последовательность бесконечно коротких импульсов, амплитуды которых и расположение на временной оси соответствуют амплитудам и относительным задержкам лучей, приходящих в точку приема. В этом случае формирование оценки ИХК сводится к следующим этапам:

нахождение оценки стандарта шума $\hat{\sigma}_{\text{ш}}$ в реализации $y_1(n)$;

вычисление величины порога обнаружения сигнала в луче $\Pi = k\hat{\sigma}_{\text{ш}}$ (k – регулируемая константа);

фиксация всех отсчетов массива $\hat{y}_1(n)$, превышающих порог Π (т. е. принятия решений об обнаружении сигналов в лучах);

оценивание амплитуд этих отсчетов и их положения на оси времени (т. е. амплитуд и положения на оси времени сигналов, приходящих в точку приема в отдельных лучах).

Эмпирически установлена целесообразная величина константы: $k = 4,5$. Оцениванию стандарта шума предшествует отбор 10 % наибольших по уровню отсчетов из массива $\hat{y}_1(n)$ и дальнейшее их удаление из этого массива. Затем искомая оценка стандарта шума $\hat{\sigma}_{\text{ш}}$ классически вычисляется по массиву оставшихся отсчетов. Оценивание амплитуд h_i и временного положения t_i лучей (отсчет времени выполняется относительно середины ИХК) производится на основе соответствующей параболической интерполяции следующим образом [6]:

$$\hat{h}_i = y_1(n_i) - 0,25[\hat{y}_1(n_i + 1) - \hat{y}_1(n_i - 1)]\Delta t;$$

$$t_i = \frac{(n_i + \Delta t)}{f_{\text{д}}};$$

$$\Delta t = 0,5[\hat{y}_1(n_i - 1) - \hat{y}_1(n_i + 1)] / [\hat{y}_1(n_i + 1) - 2\hat{y}_1(n_i) + \hat{y}_1(n_i - 1)], \quad (3)$$

где n_i – номер временного отсчета, соответствующего моменту обнаружения сигнала в i -м луче.

Алгоритм 2. Это алгоритм, следующий из соотношений (1) с учетом теоремы о свертке [7]. При сформированной оценке УИХК1 $\hat{y}_1(n)$ вычисление искомой оценки УИХК2 $y_2(n)$ реализуется следующим образом:

$$\hat{y}_{1 \rightarrow 2}(n) = \text{ОДПФ}\{Y_2(k)\}; \quad (4)$$

$$Y_2(k) = S_1(k)\hat{y}_1(k) / S_2(k),$$

где $\text{ОДПФ}\{Y_2(k)\}$ – результат выполнения операции обратного дискретного преобразования Фурье над массивом спектральных отсчетов $Y_2(k)$; $S_1(k)$, $S_2(k)$, $\hat{y}_1(k)$ – результаты вычисления операции дискретного преобразования Фурье от реализаций сигналов $S_1(n)$ и $S_2(n)$, а также оценки УИХК1 $\hat{y}_1(n)$.

Все спектры, входящие в соотношения (4), – это спектры соответствующих комплексных огибающих.

Следует отметить, что этот вариант алгоритма (в отличие от двух остальных) не связан с ограничением модели многолучевого канала. Ограничение вызвано предположением, что ИХК представляет собой решетчатую функцию.

Алгоритм 3. Этот вариант представляет собой комбинацию двух остальных. Он предусматривает вычисление оценки $y_{1 \rightarrow 2}(n)_{\text{пр}}$ по формуле (3), но эта оценка рассматривается только как промежуточная (в отличие от алгоритма 2). Далее над ней выполняются все операции, которые в алгоритме 1 выполняются над оценкой $y_1(n)$ с получением оценки ИХК $\hat{h}(n)$. После этого искомая оценка $y_{1 \rightarrow 2}(n)$ формируется по формуле (2).

Методика эмпирического анализа качества алгоритмов трансформации рабочего диапазона частот

Критерием качества алгоритма трансформации служит величина отношения

$K = k1 / k0$. Величины $k0$ и $k1$ определяются как

$$k1 = \frac{\sum_n \hat{y}_{1 \rightarrow 2}(n) \hat{y}_{2_0}(n)}{\sqrt{\sum_n \hat{y}_{1 \rightarrow 2}^2(n) \sum_n \hat{y}_{2_0}^2(n)}}; \quad (5)$$

$$k0 = \frac{\sum_n \hat{y}'_2(n) \hat{y}''_2(n)}{\sqrt{\sum_n \hat{y}'_2{}^2(n) \sum_n \hat{y}''_2{}^2(n)}}.$$

Здесь $k1$ – значение нормированной корреляции между оценкой УИХК2 $\hat{y}_{1 \rightarrow 2}(n)$, пересчитанной из диапазона частот сигнала $S_1(n)$ в диапазон частот сигнала $S_2(n)$, и ее условно эталонной формой $\hat{y}_{2_0}(n)$, которая бы имела место при оценивании непосредственно в диапазоне частот сигнала $S_2(n)$. (Условно эталонная величина оценки УИХК2 $\hat{y}_{2_0}(n)$ формируется путем вычисления свертки

$$y_{2_0}(n) = АКФ_2(n) \otimes h(n)$$

и добавления к ней реализации аддитивного шума); $k0$ – значение нормированной корреляции, вычисляемой (в отличие от значения $k1$) между двумя ее эталонными формами $\hat{y}'_2(n)$ и $\hat{y}''_2(n)$, совпадающими между собой с точностью до реализаций аддитивного шума.

Все упомянутые реализации аддитивного шума не коррелированы между собой.

В процессе анализа качества задается исходная ИХК $h(n)$, нормированная так, что ее максимум равен единице. Затем вычисляется свертка этой ИХК с АКФ₁ сигнала $S_1(n)$. Результат вычисления указанной свертки $y_1(n)$ суммируется с реализацией шума, и в итоге получается оценка $\hat{y}_1(n)$ УИХК1 в диапазоне частот сигнала $S_1(n)$. Уровень (стандарт) шума $\sigma_{ш}$ варьируется. Далее моделируется собственно алгоритм пересчета, в результате чего формируется искомая оценка УИХК2, приведенная к диапазону частот сигнала $S_2(n)$ (т. е. оценка $y_{1 \rightarrow 2}(n)$).

Представленное выше определение критерия качества алгоритмов трансформации рабочего диапазона частот обосновывается однозначной связью указанной величины K применительно к СИИП (в широком круге

вариаций этого метода передачи данных) с потерями в помехоустойчивости. Последние определяются выражением $10 \lg K$. Под потерями в данном случае подразумевается разница в пороговом отношении сигнал/шум на входе приемника (декодера); она имеет место при оценивании УИХК непосредственно в требуемом диапазоне частот сигнала $S_2(n)$ (в случае передачи испытательного импульса или сигнала $S_2(n)$), а также при использовании одного из рассматриваемых алгоритмов пересчета этой оценки из диапазона частот сигнала (испытательного импульса) $S_1(n)$ в требуемый диапазон частот испытательного импульса $S_2(n)$. Актуальность такого пересчета как альтернативы оценивания УИХК непосредственно в требуемом диапазоне частот оговорена во введении.

Результаты анализа качества алгоритмов трансформации

Анализ качества алгоритмов трансформации ИХК произведен в соответствии с изложенной выше методикой для двух вариантов исходной ИХК.

Рассматриваемые варианты исходной ИХК служат примерами, характеризующими сравнительно простую (рис. 1, а) и сложную с точки зрения решаемой задачи (рис. 1, б) ситуации. При этом вариант импульсной характеристики канала, типичной для сравнительно простой ситуации и содержащей малое количество лучей, выбран произвольно; при этом он вполне возможен на практике. Вариант же указанной характеристики, типичной для сравнительно сложной ситуации и содержащей большое количество лучей, был сформирован на основе реальных данных при временном разрешении примерно 3 мс, ввиду разнообразия возможного сочетания амплитуд и задержек сигналов в лучах.

Результаты вычисления критерия качества K применительно к исходным ИХК (см. рис. 1) приведены на рис. 2. Здесь и далее отношение сигнал/шум определяется как $-20 \cdot \lg \sigma_{ш}$ (дБ).

На основании анализа графиков на рис. 2 можно сделать следующие выводы.

Алгоритмы 1 и 3 дают идентичные ре-

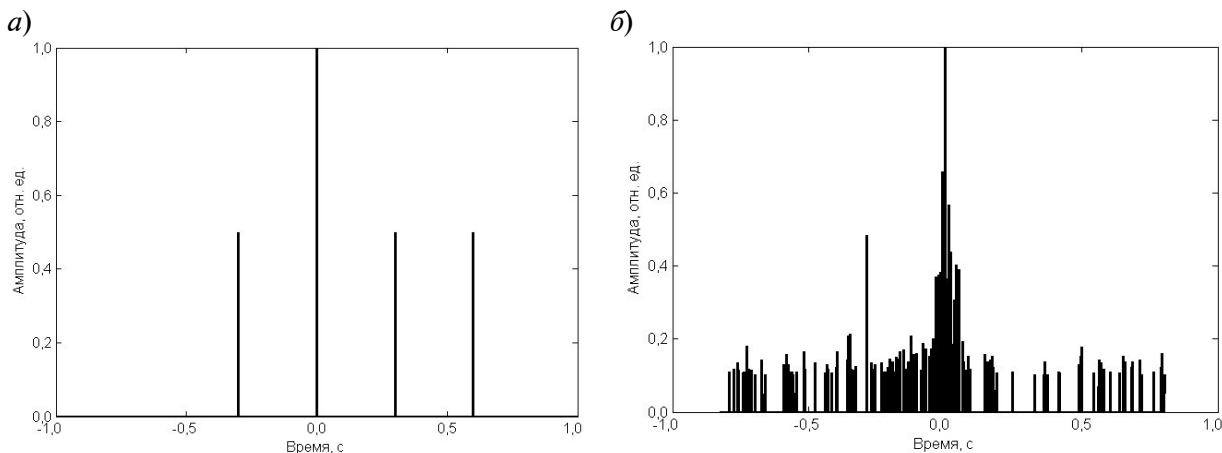


Рис. 1. Варианты исходной импульсной характеристики канала при малом (а) и большом (б) количестве лучей, приходящих в точку приема

зультаты, с точки зрения указанного выше критерия качества.

Алгоритм 2 при малом количестве лучей дает результат несколько хуже, чем алгоритмы 1 и 3, за исключением области очень низких (ниже -15 дБ) отношений сигнал/шум.

Алгоритм 2 при малых отношениях сигнал/шум значительно более эффективен, чем алгоритмы 1 и 3.

В случае большого количества лучей в области больших отношений сигнал/шум соотношение эффективностей рассматриваемых алгоритмов то же самое, что и при малом количестве лучей.

Для выбора предпочтительного алгорит-

ма для конкретных «промежуточных» случаев (типов ИХК) целесообразно провести соответствующие расчеты по предложенной методике.

Заключение

Разработаны варианты алгоритма оценивания импульсной характеристики многолучевого канала связи с трансформацией рабочего диапазона частот, т. е. пересчета оценки указанной характеристики в ее узкополосном представлении из одного диапазона частот в другой. Разработка позволяет реализовать передачу данных в соответствии с принципом СИИП при чередовании (скачкообразном изменении)

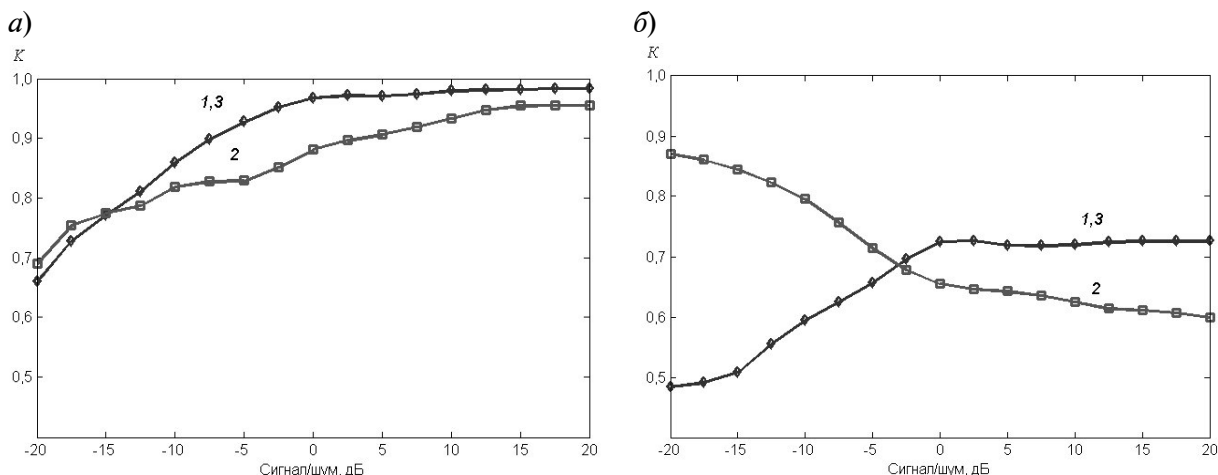


Рис. 2. Результаты вычисления критерия качества K применительно к исходным ИХК, показанным на рис. 1, а (а) и б (б). Номера кривых соответствуют номерам алгоритмов



диапазонов частот передачи испытательных импульсов. Применение такого преобразования, как известно, позволяет исключать искажения формы этих импульсов из-за межсимвольной интерференции.

Приведены методика анализа качества алгоритмов трансформации и примеры расчетов по предложенной методике. Показано, что соотношение эффективностей рассмотренных алгоритмов определяется

как формой импульсной характеристики канала, так и отношением сигнал/шум, при котором осуществляется указанная трансформация. Установлено, что в зависимости от конкретных условий (количество принимаемых лучей и отношение сигнал/шум) предпочтительными могут быть как алгоритм 2, так и эквивалентные между собой (в свете рассмотренного критерия качества) алгоритмы 1 и 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольденберг Л.М., Кловский Д.Д. Метод приема импульсных сигналов, основанный на использовании вычислительных машин // Труды ЛЭИС. 1959. Вып. VII. С. 17–26.

2. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам; 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; 2-е изд. М.: ИД «Вильямс». 2003. 1105 с.

4. Кейлос Т. Каналы с параметрами, изменяющимися во времени. Лекции по теории связи. Под ред. Е.Дж. Багдади. М.: Мир, 1964. С. 68–122.

5. Ван-Трисс Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3. М.: Сов. радио, 1975. 664 с.

6. Опенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1980. 552 с.

7. Голд Б., Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов. М.: Сов радио, 1973. 368 с.

8. Кловский Д.Д. Системы оптимального приема в каналах с эхо-сигналами // Труды учебных институтов связи. 1963. Вып. 18.

9. Прокис Д.Д. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

10. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов. М.: Связь, 1980. 288 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБЕВ Анатолий Геннадиевич – доктор технических наук, заместитель по научной работе генерального директора ОАО «Камчатский гидрофизический институт».

197183, Россия, г. Санкт-Петербург, Липовая аллея, 9
agg300@mail.ru

МОЛЧАНОВ Павел Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник отдела комплексного проектирования ОАО «Камчатский гидрофизический институт».

684090, Россия, Камчатский край, г. Вилючинск, Академическая ул., 3
pasha@kgfi.ru

Golubev A.G., Molchanov P.A. ESTIMATION ALGORITHMS FOR IMPULSE RESPONSE OF MULTIBEAM COMMUNICATION CHANNEL WITH TRANSFORMATION OF THE WORKING FREQUENCY BAND.

In transmission messages, the prediction about the form of every information signal, as a rule, is carried out using response of communication channel on test impulses. To avoid errors in predictions of intersymbol interference it is useful to apply the jump of carrier frequencies from one test impulse to another one. In this case it is necessary to make an estimate of channel impulse response in frequency band of information signals from channel response on series of test impulses, which transmitted in different frequency bands. Our article focuses on the algorithms for this estimation.

MULTIBEAM COMMUNICATION CHANNEL, TEST PULSE, ESTIMATION ALGORITHM, ESTIMATION ERROR, PULSE RESPONSE, CORRELATION, AUTOCORRELATION FUNCTION.

REFERENCES

1. Goldenberg L.M., Klovsky D.D. Method of receiving of impulse signals based on using of

computers. *Proceeding of LEIC*, 1959. No.VII. pp. 17-26 (rus).

2. **Klovsky D.D.** Transmission of discrete messages in radio channels. 2 edition, M.: Mir Publishers: Radio and communication. 1982. 304 p. (rus)
3. **Sclyar B.** Digital communication. Theoretical basis and practice. 2 edition., Moscow: «Viliams» Publishers. 2003. 1105 p. (rus)
4. **Keilos T.** Channels with time-varying parameters. Lectures on communication theory. Ed. E.D. Bagdady. Moscow: Mir Publishers, 1964. pp. 68-122. (rus)
5. **Van-Triss G.** Theory of detection, estimation and modulation. Vol. 3. Moscow: Soviet Radio Publishers, 1975. 664 p. (rus)
6. **Oppengeim E.** Implementation of digital signal processing. Moscow: Mir Publishers, 1980. 552 p. (rus)
7. **Gold B., Reider C.** Digital signal processing. Moscow: Soviet Radio Publishers, 1973, 368 p. (rus)
8. **Klovsky D.D.** System of optimal receiving in eho-channels. *Proceeding of educational communication institutes*. 1963. Vol.18. (rus)
9. **Proakis J.G.** Digital communications. Moscow: Radio and communication, 2000, 800 p. (rus)
10. **Zyko A.G., Klovsky D.D., Nazarov M.V., Fink L.M.** The theory of signal transmission. Moscow: Communication, 1980. 288 p. (rus)

THE AUTHORS

GOLUBEV Anatoly G.

Kamchatka Hydrophysical Institute JSC
197183, Lipovaya Ave. 9, St. Petersburg, Russia
agg300@mail.ru

MOLCHANOV Pavel A.

Kamchatka Hydrophysical Institute JSC
684090, Akademicheskaya Str. 3, Vilyuchinsk, Kamchatka Krai, Russia
pasha@kgfi.ru