

# Радиолокационные системы

УДК 621.396.69

## КОРРЕКЦИЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

**Баскаков Александр Ильич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических приборов  
и антенных систем ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
E-mail: BaskakovAI@mpei.ru.

**Болдинов Роман Олегович**

студент ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
E-mail: BoldinovRO92@yandex.ru.

Адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14.

**Аннотация:** В настоящее время, как в радиолокации, так и в гидролокации применяются сложные сигналы с различными видами частотной модуляции. Актуальной задачей является исследование свойств и применение новых видов сигналов, например с нелинейными законами изменения частотной модуляции. Такие сигналы имеют ряд положительных свойств, основное из которых – приближение временного сечения автокорреляционной функции к точечному виду (дельта функции). Это свойство устраняет неоднозначность определения доплеровского сдвига, присущую сигналу с линейной частотной модуляцией. Основным недостатком этих сигналов является высокий уровень боковых лепестков. Так как одно из основных требований к приёмному тракту локатора – работа в широком динамическом диапазоне, то возникает проблема обеспечения на выходе оптимального приёмника, например, согласованного фильтра, как можно меньшего уровня боковых лепестков автокорреляционной функции принимаемого сигнала. В настоящей работе показано, как можно подбором оконной функции наилучшим образом подавить боковые лепестки при минимальном проигрыше в энергетике и разрешающей способности. Проведено исследование влияния известных оконных функций на исследуемые виды сигналов сложной формы с нелинейными видами частотной модуляции. Также проведён расчет отношения сигнал/шум, определён проигрыш в энергетике на выходе корректирующего фильтра. Полученные результаты сравниваются с наиболее используемым в настоящее время сигналом с линейной частотной модуляцией. Произведён поиск наилучшего «окна» по критерию максимума подавления боковых лепестков автокорреляционной функции рассматриваемого сигнала, при минимальной потере в энергетике и разрешающей способности.

**Ключевые слова:** оконная функция, корректирующий фильтр, боковые лепестки, проигрыш в энергетике и разрешающей способности.

### Введение

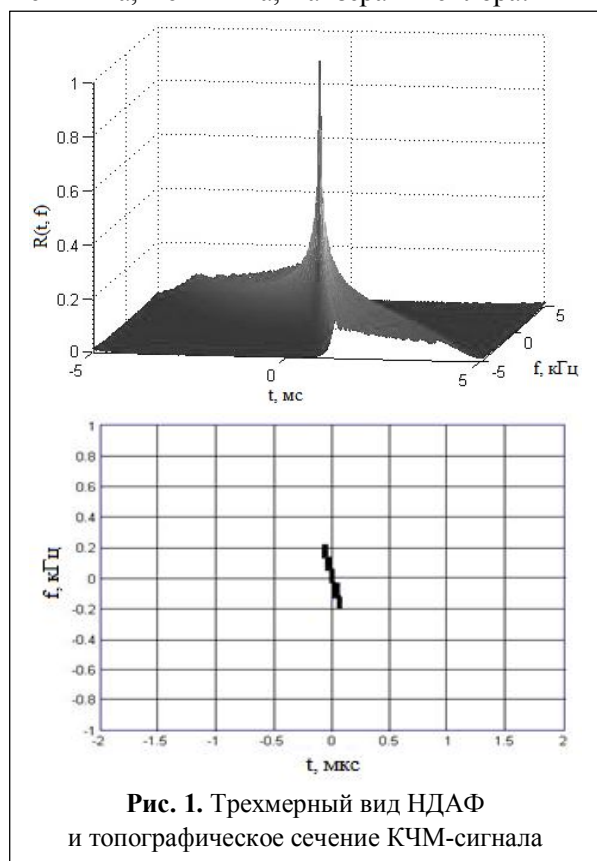
В настоящее время, как в радиолокации, так и в гидролокации широко используются радиоимпульсы с частотной модуляцией.

Описание сигнала представляет собой функцию, зависящую от временных и пространственных координат. После пространственной обработки в приёмной антенне или в случае, если приёмная антенна имеет малые

размеры по сравнению с длиной волны принимаемого колебания, сигнал представляет собой лишь функцию времени [1].

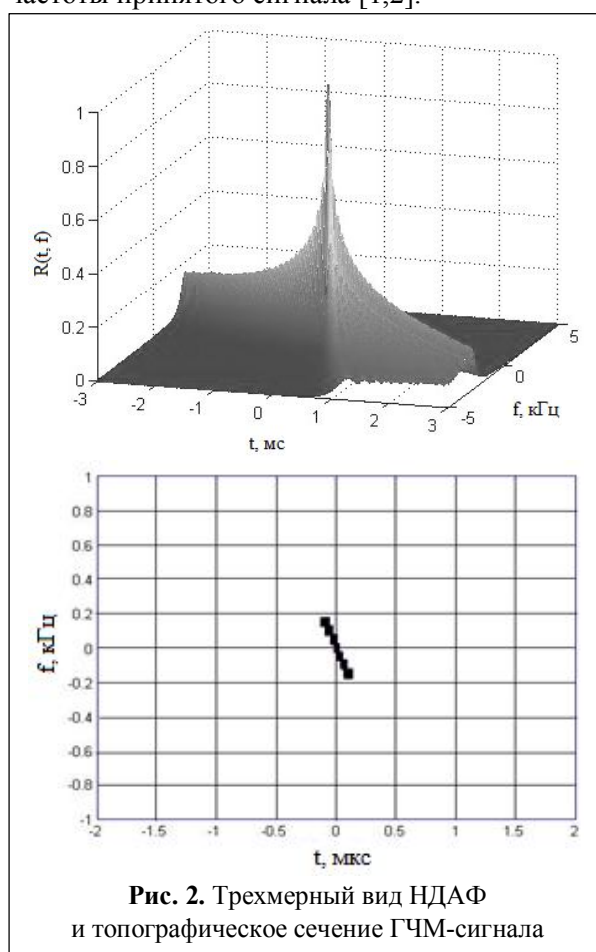
Одно из основных требований, предъявляемых к приёмному тракту локатора – работа в широком динамическом диапазоне принимаемых сигналов. Отсюда возникает проблема обеспечения на выходе оптимального приёмника, например, согласованного фильтра, ми-

нимального уровня боковых лепестков (УБЛ) автокорреляционной функции (АКФ) принятого сигнала. Одним из способов подавления УБЛ является применение различных весовых функций или весовых «окон». При перемножении используемой весовой функции и спектра сигнала происходит сглаживание его переднего и заднего фронтов, за счёт чего можно добиться значительного подавления боковых лепестков АКФ. Платой за подавление боковых лепестков является потеря в энергетике и разрешающей способности, т.е. расширение главного максимума автокорреляционной функции и потери в отношении сигнал/шум. В настоящей работе выбраны наиболее известные оконные функции: Бартлетта-Хэннинга, Хэмминга, Кайзера и Тэйлора.



Зондирующие сигналы современных локационных систем характеризуются большими возможностями адаптации параметров сигнала в зависимости от различных факторов: вида помехи, условий распространения, формы исследуемого объекта. В зависимости от этого в локаторах применяют различные сигналы,

каждый из которых оптимизирован к решению конкретной задачи в конкретной тактической ситуации. Вид внутриимпульсной модуляции характеризует степень независимости выходного отклика тракта обработки от радиальной составляющей скорости цели. Переход от линейной частотной модуляции к более сложным типам модуляции обусловлен тем, что трёхмерная НДАФ этих сигналов приближается к виду дельта функции, что позволяет без неоднозначности определять скорость движения исследуемого объекта, т.е. доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала [1,2].



В настоящей работе исследуется влияние весовых «окон» на следующие виды сигналов:

- сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ);
- сигнал с квадратичной частотной модуляцией (КЧМ);
- сигнал с гиперболической частотной модуляцией (ГЧМ).

На рис. 1 показаны трёхмерный вид НДАФ и её топографическое сечение для сигнала с квадратичной частотной модуляцией. На рис. 2 показаны трёхмерный вид НДАФ и её топографическое сечение для сигнала с гиперболической частотной модуляцией. В качестве примера, для сравнения этих сигналов, выберем коэффициент сжатия равный 240.

**Сигнал с внутриимпульсной гиперболической частотной модуляцией (ГЧМ)**

Аналитическая запись ГЧМ-сигнала имеет вид:

$$S(t) = U_0 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \left(f_0 - \frac{\Delta f}{2}\right) \cdot t - 2\pi \cdot \Delta f \cdot \frac{1}{k} \cdot \ln(1 - k \cdot t)\right),$$

$$-\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2}, \quad (1)$$

где  $f_0$  – центральная частота;  $\Delta f$  – девиация частоты;  $U_0$  – амплитуда сигнала;  $\tau_u$  – длительность сигнала.

Нормированный модуль спектра  $U/U_0$  сигнала представлен на рис. 3.

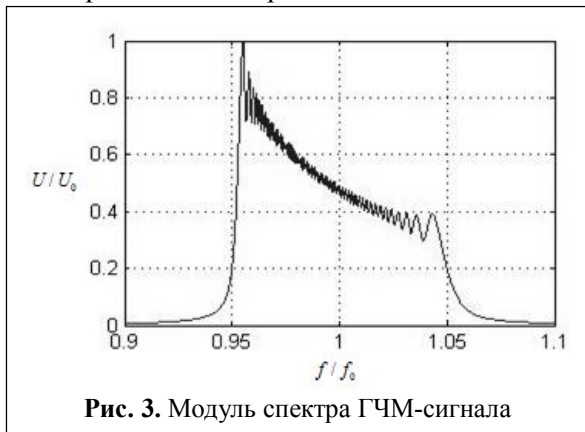


Рис. 3. Модуль спектра ГЧМ-сигнала

Для каждой реализации весовой обработки найдём проигрыш в энергии относительно сигнала без обработки оконной функцией. Запишем выражения для отношения мощности сигнала  $P_c$  к мощности шума  $P_{ш}$  [2]:

$$q^2 = \frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{U_{вых. max}^2}{\sigma_{ш}^2}, \quad (2)$$

где  $U_{вых. max}$  – пиковое значение амплитуды выходного сжатого импульса;  $\sigma_{ш}^2$  – дисперсия шума. Дисперсия шума выражается через спектральную плотность мощности  $N_0$  и эффективную ширину спектра  $\Delta f_{эфф}$ :

$$\sigma_{ш}^2 = N_0 \cdot \Delta f_{эфф}. \quad (3)$$

$$\Delta f_{эфф} = \frac{1}{N_0 \cdot 2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} S_{вых}^2(\omega - \omega_0) d\omega$$

– эффективная ширина спектра на выходе оптимального согласованного фильтра с введением соответствующей весовой обработки,  $S_{вых}$  – спектральная плотность сигнала на выходе оптимального согласованного фильтра.

Известно [3], что на выходе оптимального фильтра реализуется отношение сигнал/шум, равное:

$$q_{opt}^2 = \frac{2 \cdot \mathcal{E}_c}{N_0}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_c = \frac{U_{вых. max}^2 \cdot \tau_u}{2}$  – энергия сигнала. Окончательно запишем:

$$q_{opt}^2 = \frac{U_{вых. max. opt}^2 \cdot \tau_u}{N_0}. \quad (5)$$

Проигрыш в отношении сигнал/шум при действии на входе корректирующей цепи ГЧМ импульса с шумом со спектральной плотностью  $N_0$ :

$$\Pi = \frac{q^2}{q_{opt}^2} \quad (6)$$

Результаты влияния «окон» на ширину главного лепестка  $R(t)$  сигнала представлены на рис. 4. Количественные значения расчетов сведены в таблицы 1-3.

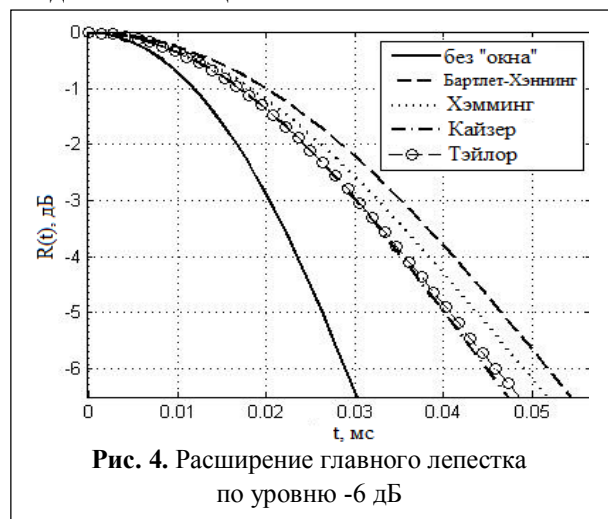


Рис. 4. Расширение главного лепестка по уровню -6 дБ

**Таблица 1.** Результаты воздействия оконных функций на ЛЧМ-сигнал

Оконная функция	Уровень первого бокового лепестка, дБ	Расширение главного лепестка, раз	Проигрыш в отношении с/ш, дБ
Без оконной функции	-13	1	0
Бартлет-Хэннинг	-36	1,6	-2,92
Хэмминг	-42	1,5	-2,54
Кайзер	-35	1,47	-2,28
Тэйлор	-35	1,35	-1,8

**Таблица 2.** Результаты воздействия оконных функций на КЧМ-сигнал

Оконная функция	Уровень первого бокового лепестка, дБ	Расширение главного лепестка, раз	Проигрыш в отношении с/ш, дБ
Без оконной функции	-9	1	0
Бартлет-Хэннинг	-38	1,65	-2,28
Хэмминг	-30	1,56	-1,67
Кайзер	-35	1,65	-1,91
Тэйлор	-35	1,67	-2,24

**Таблица 3.** Результаты воздействия оконных функций на ГЧМ-сигнал

Оконная функция	Уровень первого бокового лепестка, дБ	Расширение главного лепестка, раз	Проигрыш в отношении с/ш, дБ
Без оконной функции	-9	1	0
Бартлет-Хэннинг	-47	1,79	-2,22
Хэмминг	-38	1,69	-2,72
Кайзер	-36	1,55	-1,21
Тэйлор	-36	1,57	-1,37

Таким образом, анализируя результаты работы можно сказать, что не существует универсальной весовой функции, которая обеспечивала бы наилучшие параметры для рассматриваемых сигналов.

В общем случае, для конкретного сигнала наилучшая весовая функция выбирается по критерию максимального подавления боковых лепестков при минимальном проигрыше в энергетике и разрешающей способности.

#### Литература

1. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др. Справочник по гидроакустике/ 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1988. - 552 с.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы/ Пер. с английского по ред. В.С. Кельзона. - М.: Советское радио, 1971. – 568 с.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-0800375а, 13-08-97538), Российского научного фонда (проект № 14-49-00079) и Государственного задания в сфере научной деятельности в проектной части № 8.152.2014/К.*

**Поступила 29 октября 2014 г.**

3. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. Локационные методы исследования объектов и сред: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования/ Под ред. А.И. Баскакова. – М.: Изд. центр «Академия», 2011. – 384 с.

4. Levanon Nadav, Mozeson Eli Radar Signals, John Wiley and Sons, New Jersey, 2004, 411p.

5. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, Proceeding of IEEE, Vol. 66, No. 1, January 1978.

6. Nuttall A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior, IEEE Trans. On Acoust. Speech, and Signal Proc., Vol. ASSP-29, No. 1, February 1981.

7. Ричард Лайонс Цифровая обработка сигналов/ Пер. с английского под ред. А.А. Бритова. М.: ООО «Бном-Пресс», 2006. – 656 с.

8. Brookner Eli Practical Phased Array Antenna Systems, Lex Book, Lexington, MA, 1991.

## Correction of side lobes of an autocorrelation function of radar and sonar signals of complex shape

**Baskakov Alexander Ilyich** – Doctor in Engineering, Professor Department of Radio Devices and Antenna Systems federal state budgetary educational institution of higher professional education “National Research University “Moscow Energy Institute”.

*E-mail:* BaskakovAI@mpei.ru.

**Boldinov Roman Olegovich** – student federal state budgetary educational institution of higher professional education “National Research University “Moscow Energy Institute”.

*E-mail:* BoldinovRO92@yandex.ru.

*Address:* 111250, Moscow, ulitsa Krasnokazarmennaya, 14.

*Abstract:* At present complex signals with different types of frequency modulation are applied both in a radiolocation, and in hydro location. Critical task is investigation of properties and application of new types of signals, for example, with non-linear laws of frequency modulation change. Such signals have a number of advantages, the main of which is approximation of temporary sectional view of an autocorrelation function to a pointwise view (function delta). This property removes definition ambiguity of the Doppler shift attributed to the signal with linear frequency modulation. The main disadvantage of these signals is high level of side lobes. As one of the main requirements to the receiving tract of a detector is the operation in broad dynamic range so the problem arises which is connected with provision in the output of the optimal receiver, for example, the matched filter with the smallest level of side lobes of an autocorrelation function of the accepted signal. The article shows the best way of side lobes suppression with low power loss and resolution capability by means of window function selection.

The investigation of the known window function influence on the studied signal of complex forms with non-linear types of frequency modulation has been conducted. The calculation of signal-to-noise ratio and power loss in the output of the compensating filter has been made. The obtained results are compared with the most common signal with linear frequency modulation. The search for the best "window" by maximum suppression of side slope of an autocorrelation function of the considered signal with minimum loss in power and resolution capability has been done.

*Key words:* the window function, the compensating filter, side lobes, power loss and resolution capability.

### References

1. Evtuytov A.P., Kolesnikov A.E., Korepin E.A., etc. The reference manual on hydro-acoustics. - 2nd(2) publ. - L.: Sudostroenie, 1988. 552 p.
2. Ch. Kuk, M. of Bernfeld. Radar signals / Transl. from English. Ed. by V.S.Kelzona. M.: Izd. «Sovetskoye Radio», 1971. 568p.
3. Baskakov A.I, Zhutyayeva T.S., Lukashenko Yu.I. Locational research techniques of objects and environments: The textbook for stud. organizations vyssh. prof. edu. - Ed. by A.I. Baskakova. - M.: Izd. center "Academia", 2011.- 384 p.
4. Nadav Levanon, Eli Mozeson, Radar Signals, John Wiley and Sons, New Jersey, 2004, 411p.
5. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, Proceeding of IEEE, Vol. 66, No. 1, January 1978.
6. Nuttall A.H. Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior, IEEE Trans. On Acoust. Speech, and Signal Proc., Vol. ASSP-29, No. 1, February 1981.
7. Richard Lyons, Numeral processing of signals / Transl. from English ed. by A.A. Britova. M.: OOO "Bnom-Press", 2006. 656p.
8. Eli Brookner, Practical Phased Array Antenna Systems, Lex Book, Lexington, MA, 1991.