

УДК 621.396.62

## Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков<sup>1</sup>

Синицын Е. А., Фридман Л. Б., Ершов Г. А.

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
пр. Обуховской обороны, 120, Санкт-Петербург, 192012, Российская Федерация  
esinit@yandex.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

**Аннотация:** Представлены результаты оптимизации закона нелинейной частотной модуляции сложных радиолокационных сигналов и соответствующего фильтра сжатия, обеспечивающих минимальный уровень боковых лепестков и низкие потери для выходного сигнала приемного канала когерентно-импульсных радиолокационных станций управления воздушным движением. Показано, что потери рассогласования при оптимизации коэффициентов закона нелинейной частотной модуляции мало отличаются для разных длительностей зондирующих импульсов, что делает возможным применение предложенного закона как для сигналов с большой базой (большой длительности), так и для сигналов с малой и средней базой. По результатам исследований продемонстрировано, что сочетание фильтра, синтезированного по методу обратных пульсаций, и оптимизированного закона нелинейной частотной модуляции позволяет получить сжатый сигнал с очень низким уровнем боковых лепестков (минус 100 дБ и ниже относительно главного лепестка) и пренебрежимо малыми потерями в отношении сигнал/шум (менее 0,1 дБ).

**Ключевые слова:** нелинейная частотная модуляция, фильтр сжатия, уровень боковых лепестков, отношение сигнал/шум, радиолокационные станции управления воздушным движением.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

*Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):* Синицын Е. А., Фридман Л. Б., Ершов Г. А. Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 174—179.

*Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):* Синицын, Е. А. Синтез и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией и минимальным уровнем боковых лепестков / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман, Г. А. Ершов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 174—179.

## Synthesis and processing of pulse radar signals with nonlinear frequency modulation and minimum sidelobe level

E. A. Sinitsin, L. B. Fridman, and G. A. Ershov

*Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”*

*120, Pr. Obukhovskoi Oborony, S-Petersburg, 192012, Russian Federation  
lenya2002@bk.ru*

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

**Abstract:** *The results of optimization of the law of nonlinear frequency modulation for wideband radar signals and of the corresponding compression filter are presented. The criteria used in the optimization were minimum sidelobe level and power loss in the output signal of the receiving channels of coherent pulse air traffic control radars. It is shown that the mismatch losses at the optimization of the coefficients of the nonlinear frequency modulation law are slightly different for different durations of transmitted pulses. In this regard, it is possible to apply the proposed law for both large-base (long duration) and small and medium base signals. According to the results of the research, it is demonstrated that the combination of the filter synthesized by the method of inverse pulsations and the optimized law of nonlinear frequency modulation allows to obtain a compressed signal with a very low sidelobe level (minus 100 dB and below relative to the main peak) and negligible signal-to-noise losses (less than 0.1 dB).*

**Keywords:** *nonlinear frequency modulation, compression filter, sidelobe level, signal-to-noise ratio, air traffic control radars.*

**For citation (IEEE):** E. A. Sinitsin et al. “Synthesis and processing of pulse radar signals with nonlinear frequency modulation and minimum sidelobe level,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 174–179, 2019. (In Russ.).  
doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.16

## 1. Введение

В настоящее время в радиолокационных станциях (РЛС) управления воздушным движением (УВД) применяют длинные (десятки и сотни микросекунд) зондирующие радиоимпульсы с частотной модуляцией [1, 2]. Большая длительность импульса обеспечивает энергию сигнала, необходимую для обнаружения воздушных целей на больших дальностях, а внутриимпульсная частотная модуляция (ЧМ) — требуемое разрешение и необходимые точностные характеристики по дальности после согласованной обработки (сжатия) принимаемых радиолокационных сигналов. Применение принципа сжатия позволяет использовать передатчики меньшей импульсной мощности, что значительно снижает стоимость РЛС и повышает ее надежность. Однако такой подход имеет два недостатка, приводящих к снижению вероятности правильного обнаружения воздушных объектов: появление боковых лепестков в сжатом сигнале, которые могут маскировать слабые цели, и потери в отношении сигнал/шум (ОСШ), обусловленные применением способов сжатия, отличных от оптимальных.

Цель работы — синтез импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией, обеспечивающих минимизацию уровня боковых лепестков и потерь сжатого сигнала.

## 2. Объект исследований и применение метода обратных пульсаций

Объект исследований — формирование и обработка импульсных радиолокационных сигналов с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ) по методу обратных пульсаций (МОП) [1], использование которого для минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ) позволяет представить передаточную характеристику фильтра сжатия в виде выражения

$$\dot{H}(f) = \frac{L(f)}{S_{\text{ex}}(f)}, \quad (1)$$

где  $L(f)$  — требуемый амплитудный спектр сжатого сигнала,  $S_{\text{ex}}(f)$  — спектр входного сигнала.

В качестве  $L(f)$  может быть использована весовая функция (ВФ) Дольфа — Чебышева, гарантирующая заданный УБЛ при минимальной длительности основного лепестка, ее тейлоровская аппроксимация [2] или ВФ Гаусса [3, 4]. Недостаток прямого использования МОП — высокая чувствительность к доплеровскому сдвигу частоты, что обусловлено френелевскими пульсациями в спектре исходного НЧМ импульса. В [2, 5, 6]

показано, что уменьшение пульсаций может достигаться путем сглаживания фронта и среза НЧМ импульса, однако для радиолокационных систем высокой мощности желательно найти метод регулирования амплитудных пульсаций спектра, который бы не требовал необходимости регулировки огибающей НЧМ импульса. Этого можно достигнуть предискажением закона частотной модуляции сигнала.

### 3. УБЛ и потеря сжатия НЧМ сигналов

Показано, что предискажение закона ЧМ на краях импульса приводит к уменьшению пульсаций в его спектре, при этом функция предискажения ЧМ должна иметь участки резкого возрастания частоты на краях импульса. Так для линейной ЧМ (ЛЧМ) предискажение закона частотной модуляции позволяет снизить уровень пульсаций на вершине спектра ЛЧМ импульса примерно в 2 раза.

Отмечается, что дальнейшего снижения пульсаций в спектре можно добиться, применив закон НЧМ вида

$$f(t) = \frac{t}{\tau} \left( \Delta F_L + \Delta F_C \frac{1}{\sqrt{1 - 4(t^2 / \tau^2)}} \right), -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}, \quad (2)$$

где  $\Delta F_L$  — девиация частоты линейного члена,  $\Delta F_C$  — девиация частоты нелинейного члена,  $\tau$  — длительность импульса.

На типовом примере  $\tau=50$  мкс,  $\Delta F_L=0,5$  МГц,  $\Delta F_C=0,12$  МГц для закона (2) продемонстрировано, что спектр сигнала принимает вид гауссовой кривой с малым уровнем пульсаций.

Показано, что подбирая закон ЧМ сигнала, можно добиться минимальных потерь в ОСШ. В частности, этого можно достичь, оптимизируя коэффициенты в выражении (2) для НЧМ сигнала, и обеспечить такое взаимодействие сигнала с фильтром, при котором чувствительность к доплеровским сдвигам частоты будет меньше, чем при использовании ЛЧМ импульса, а потери в ОСШ будут минимальны. Для минимизации потерь НЧМ сигнала требуется найти такие значения  $\Delta F_L$  и  $\Delta F_C$  при заданной  $L(f)$ , при которых будет достигаться минимальное значение полученного выражения

$$\min_{\Delta F_L, \Delta F_C} \left( 10 \lg \left( \frac{E_S}{W_0} \right) - 10 \lg \left( \frac{\max_t \left( \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{\omega}(f) \dot{H}(f) e^{j2\pi f t} df \right|^2 \right)}{\int_{-\infty}^{\infty} W_0 |\dot{H}(f)|^2 df} \right) \right), \quad (3)$$

где  $E_S$  и  $W_0$  — энергия сигнала и спектральная плотность мощности шума соответственно.

#### 4. Заключение

Отмечается, что между требуемым значением уровня боковых лепестков, регулируемым при помощи ВФ передаточной характеристики фильтра сжатия, и длительностью сжатого сигнала наблюдается обратная зависимость, поэтому требования достижения одновременно низкого УБЛ и малой длительности сжатого сигнала противоречивы, а весовая функция передаточной характеристики фильтра должна выбираться с учетом компромиссного выполнения данных требований для заданной ширины полосы пропускания приемного канала РЛС.

Показано, что потери рассогласования при оптимизации коэффициентов закона НЧМ мало отличаются для разных длительностей зондирующих импульсов, что делает возможным применение закона (2) как для сигналов с большой базой (большой длительности), так и для сигналов с малой и средней базой. Исключения составляют некоторые частные случаи с весовыми функциями Дольфа — Чебышева и Гаусса.

По результатам исследований продемонстрировано, что сочетание фильтра, синтезированного по методу обратных пульсаций, и оптимизированного закона нелинейной частотной модуляции позволяет получить сжатый сигнал с очень низким УБЛ (минус 100 дБ и ниже относительно главного лепестка) и пренебрежимо малыми потерями в ОСШ (менее 0,1 дБ).

#### Список литературы

1. Родионов В. В. и др. Методы формирования и обработки радиолокационных сигналов с малой базой и низким уровнем боковых лепестков функции неопределенности по дальности. В кн. : VII Междунар. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Т. 3 (Воронеж, 2001 г.). 2001. С. 1460—1467.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы : пер. с англ. / Под ред. В. С. Кельзона. М. : Сов. Радио, 1971. 568 с.
3. Хэррис Ф. Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 1. С. 60—96.
4. Андриенко В. Б., Беседа А. Л. и др. Когерентная обработка сигналов в первичных радиолокационных станциях. СПб, 2008. 234 с.
5. Оконешников В. С. Кочемасов В. Н. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 82—94.
6. Беседа А.Л. Зубков М.В. Сигналы с нелинейной частотной модуляцией, имеющие низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции // Вопросы радиоэлектроники. Серия радиолокационная техника. 2008. Вып. 2. С. 101—112.

7. Nadav Levanon, Eli Mozeson. Radar Signals. IEEE Press, 2004. 427 с.
8. Price, R. Chebyshev low pulse compression sidelobes via nonlinear FM // National Radio Science Meeting of URSI (Seattle, WA June 18, 1979).

### **Информация об авторах**

**Синицын Евгений Александрович**, Главный конструктор по системам радиолокации Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Фридман Леонид Борисович**, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Ершов Герман Анатольевич**, Заместитель генерального конструктора — начальник управления проектами Всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

### **Information about the authors**

**Eugeny A. Sinitin**, chief designer of radar systems of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.

**Leonid B. Fridman**, senior scientific researcher of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.

**German A. Ershov**, deputy general designer – head of project management of the Joint-stock company “All-Russian Research Institute of Radio”, St-Petersburg, Russian Federation.