

УДК 621.396

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ БОРТОВЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ
С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ**

Р. В. Антипенский, А. Н. Катруша, Е. Е. Назаров

ВУНЦ ВВС ВВА

Поступила в редакцию 30.04.2020 г.

Аннотация. На основе дискретного преобразования Фурье предложена методика определения частотных параметров зондирующих ЛЧМ-импульсов, отличающаяся применением дополнительной операцией сглаживания отсчетов амплитудно-частотного спектра сигнала. С использованием имитационного моделирования проведен статистический анализ ошибки определения ширины спектра принимаемого импульса. Показано, что применение сглаживания отсчетов сигнала после дискретного преобразования Фурье позволяет достаточно точно определять ширину спектра зондирующего импульса даже в условиях действия аддитивного шума высокого уровня.

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, оценка параметров сигналов, РЛС с синтезированием апертуры антенны.

**METHOD OF ESTIMATION OF FREQUENCY PARAMETERS
OF PROBING SIGNALS OF ONBOARD SYNTHESIZED
ANTENNA APERTURE RADARS**

R. V. Antipenskiy, A. N. Katrusha, E. E. Nazarov

Abstract. A method for estimating the frequency parameters of probing LFM pulses based on the discrete Fourier transform is proposed, which is characterized by the use of an additional operation for smoothing samples of the amplitude-frequency spectrum of the signal. A statistical analysis of the error in determining the width of the received pulse spectrum was performed using simulation modeling. It is shown that the use of smoothing of signal samples after a discrete Fourier transform makes it possible to determine the spectrum width of the probing pulse accurately even under conditions of high-level additive noise.

Keywords: linear frequency modulation, estimation of frequency parameters, synthesized antenna aperture radars.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование в современных вооруженных конфликтах беспилотных летательных аппаратов, оснащенных разведывательными многофункциональными РЛС с синтезированием апертуры антенны [1, 2], обуславливает целый ряд первоочередных задач по их нейтрализации, среди которых ключевое место отводится радиоэлектронному подавлению

© Антипенский Р. В., Катруша А. Н., Назаров Е. Е., 2020

БЛА с использованием имитирующих или сигналоподобных помех. Для формирования сигналоподобных помех современным РЛС, размещенным на БЛА и работающим в режиме синтезирования апертуры антенны (РСА), необходимо как высокоточное определение координат носителя РСА, так и высокоточная оценка сигнальных параметров РСА в сложных помеховых условиях [3]. Вопросы оценки длительности зондирующих сигналов и методы повышения точности их оценки в интересах подавления РСА сигналоподобными помехами достаточно подробно рассмотрены в работах [4–7], при этом оценка ошибок определения частотных параметров РСА в сложной помеховой обстановке остается недостаточно освещенной.

Цель работы — разработать методику оценки частотных параметров зондирующих сигналов РСА в сложной помеховой обстановке, провести статистический анализ ошибок определения параметров сигналов.

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЧМ-ИМПУЛЬСА

На сегодняшний день для определения частотных параметров сигналов широко используются цифровые методы, среди которых достаточно точным является метод спектрального анализа на основе применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [8] и легший в основу данной методики.

В качестве зондирующего сигнала в современных РСА используются сигналы с линейной частотной модуляцией, которые могут быть представлены на входе приемника станции радиотехнической разведки в следующем виде:

$$S_{\text{ЛЧМ}}(t) = U_m \cos \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{\mu t^2}{2} \right) + \psi_0 \right) + S_{\text{ш}}(t), \quad t \in [0, T_M], \quad (1)$$

где U_m , f_0 , $\mu = \Delta f_c / T_M$, ψ_0 , Δf_c — амплитуда, начальная частота, скорость изменения частоты на протяжении длительности радиоимпульса T_M (или периода модуляции в РСА с непрерывным излучением), начальная фаза и ширина спектра сигнала, $S_{\text{ш}}(t)$ — реализация аддитивных шумов и различного рода помех, в условиях воздействия которых и предстоит оценивать частотные параметры зондирующих сигналов РСА. Параметрами, подлежащими оценке, в данном случае являются начальная частота f_0 и ширина спектра сигнала Δf_c .

Для нахождения комплексного спектра с целью оценки частотных параметров дискретизированного по времени сигнала воспользуемся прямым дискретным преобразованием Фурье [9]

$$\dot{S}_{\text{ЛЧМ}}(k\Delta f) = 2\Delta t \sum_{n=0}^{N-1} S_{\text{ЛЧМ}}(n\Delta t) \exp \left(-j \frac{2\pi kn}{N} \right), \quad (2)$$

где Δt — период дискретизации, $\Delta f = 1/(N\Delta t)$ — частота дискретизации, N — число отсчетов всей принятой последовательности, $k = 0 \dots N-1$ — номер отсчета сигнала в частотной области. Тогда выражение, соответствующее алгоритму нахождения отсчетов спектра принятого ЛЧМ сигнала с учетом воздействия аддитивных шумов и помех, может быть представлено в виде:

$$S_{\text{ЛЧМ}}(k\Delta f) = \left| 2T_{\text{д}} \sum_{n=0}^{N-1} \left(U_m \cos \left(2\pi \left(f_0 n\Delta t + \frac{\mu(n\Delta t)^2}{2} \right) + \psi_0 \right) + S_{\text{ш}}(n\Delta t) \right) \exp \left(-j \frac{2\pi kn}{N} \right) \right| \quad (3)$$

На рис. 1 приведено временное (а) и спектральное (б) представления ЛЧМ-радиоимпульса при отсутствии шумовой составляющей $S_{\text{ш}}(n\Delta t)$.

Оценку ширины спектра сигнала будем проводить по достижению уровня огибающей спектра половины максимального значения, как показано на рис. 1 б. Прямоугольная область на

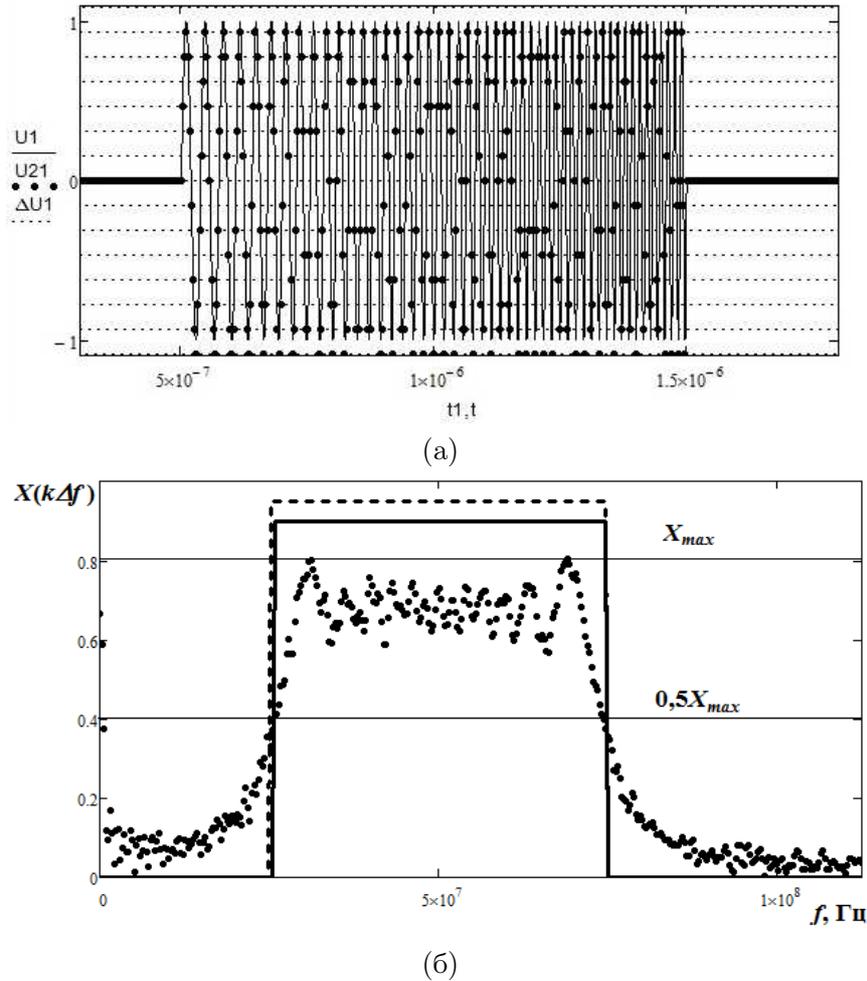


Рис. 1. Временное (а) и спектральное (б) представления ЛЧМ-радиоимпульса.

рисунке сплошной линией выделяет ширину спектра принятого радиоимпульса. Здесь же показана область оценки спектра сигнала, заданная по исходным данным (выделена штриховой линией). Видно, что в отсутствии шумов оценка ширины спектра сигнала получилась достаточно точной.

Однако при увеличении уровня шума до уровня 0,3 амплитуды сигнала дискретные отсчеты спектра сигнала приобретают существенный амплитудный разброс (рис. 2).

Разброс отсчетов приводит к увеличению ошибки определения ширины спектра сигнала. Из анализа рисунка видно, что произведенная оценка ширины спектра (сплошная линия) и исходный спектр сигнала (штриховая линия) существенно отличаются.

Для устранения существенных осцилляций спектральных отсчетов предлагается по аналогии с методикой, изложенной в [5], проводить дополнительную операцию сглаживания отсчетов сигнала различными методами.

На рис. 3 представлен результат оценки ширины спектра сигнала при использовании процедуры сглаживания методом скользящей медианы, реализованном в пакете Mathcad в виде функции medsmooth [9]. Сплошной линией показаны сглаженные значения отсчетов спектра сигнала. На рисунке также показана оценка ширины спектра по сглаженным отсчетам (сплошная линия) и исходная ширина спектра сигнала (штриховая линия).

Анализ рисунка показывает, что применение дополнительной операции сглаживания позволяет существенно повысить точность определения ширины спектра сигнала — области оце-

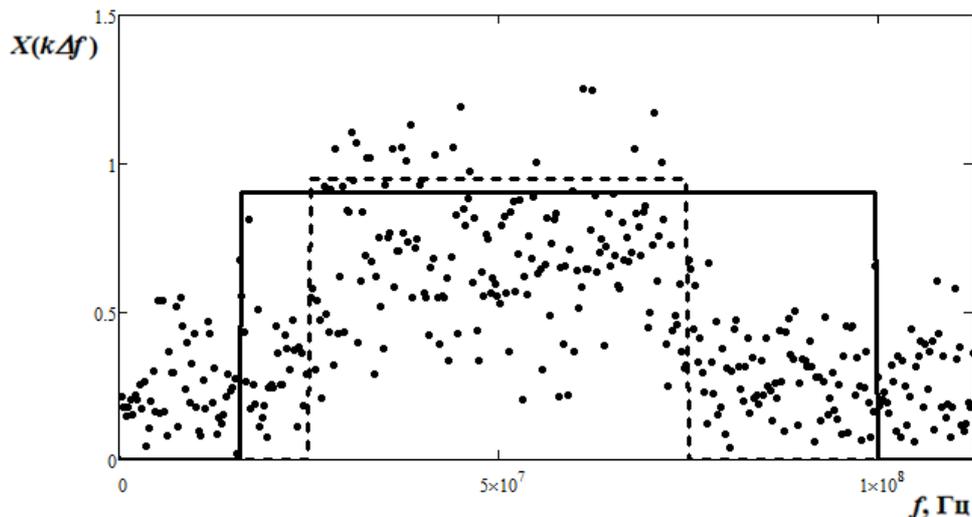


Рис. 2. Дискретные отсчеты амплитудного спектра ЛЧМ-импульса при $U_{ш} = 0,3U_c$.

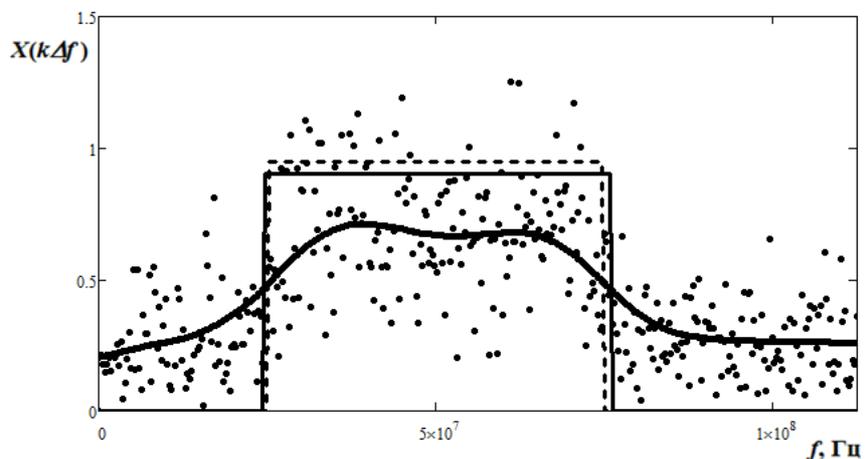


Рис. 3. Результаты оценки ширины спектра ЛЧМ-импульса при воздействии шума с применением операции сглаживания методом скользящей медианы.

нок ширины спектра принятого и исходного сигналов практически совпадают даже в условиях существенного воздействия шумов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ШИРИНЫ СПЕКТРА ЛЧМ-ИМПУЛЬСА И ИХ АНАЛИЗ

С учетом рассмотренных операций схема имитационной модели цифровой обработки ЛЧМ-импульса при определении ширины спектра сигнала может быть представлена в виде, представленном на рисунке 4.

В качестве параметра оценки точности определения ширины спектра сигнала предлагается использовать отношение суммы отклонения оценки начальной и конечной границ спектра принятого сигнала от истинных значений к ширине спектра сигнала:

$$d = \frac{|f_{н пр} - f_n| + |f_{к пр} - f_k|}{f_k - f_n} \quad (4)$$

де $f_{н,к}$ — исходные начальная и конечная частоты спектра сигнала; $f_{н,к пр}$ — начальная и ко-

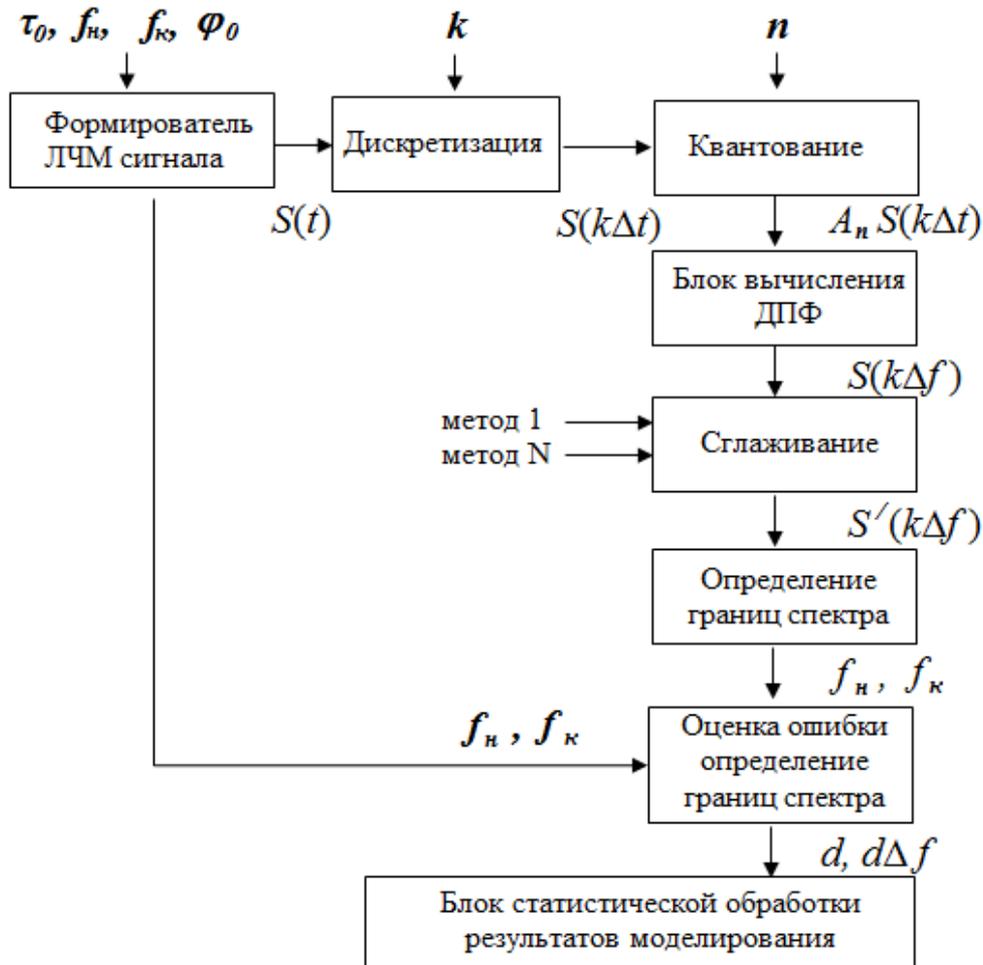


Рис. 4. Схема имитационной модели цифровой обработки ЛЧМ-импульса при определении ширины спектра сигнала.

нечная частоты спектра принятого сигнала.

Параметр d показывает степень обратной корреляции исходных границ спектра и границ спектра по результатам оценки по предложенному алгоритму и может характеризовать ошибку проводимой оценки. Параметр ошибки определяется в долях от ширины спектра сигнала. При идеальном совпадении истинных и оцененных границ спектра $d = 0$.

В результате действия шума параметр d имеет случайный характер. Задача оценки параметра d решалась численным методом на основе анализа множества реализаций N . При этом в каждой реализации моделировалось воздействие шума с равномерным распределением амплитуды.

На рис. 5 представлены огибающие гистограмм (нормированная частота) распределения параметра d при различных уровнях шума.

Для количественной оценки точности определения ширины спектра воспользуемся значением вероятности того, что параметр d не превышает заданный уровень d_0 . Для этого при обработке N реализаций определим число реализаций N_1 , в которых значение параметра ошибки d не превышает заданное значение d_0 . Вероятность определяется как частота события при большом числе реализаций N :

$$P(d < d_0) = \frac{N_1}{N} \quad (5)$$

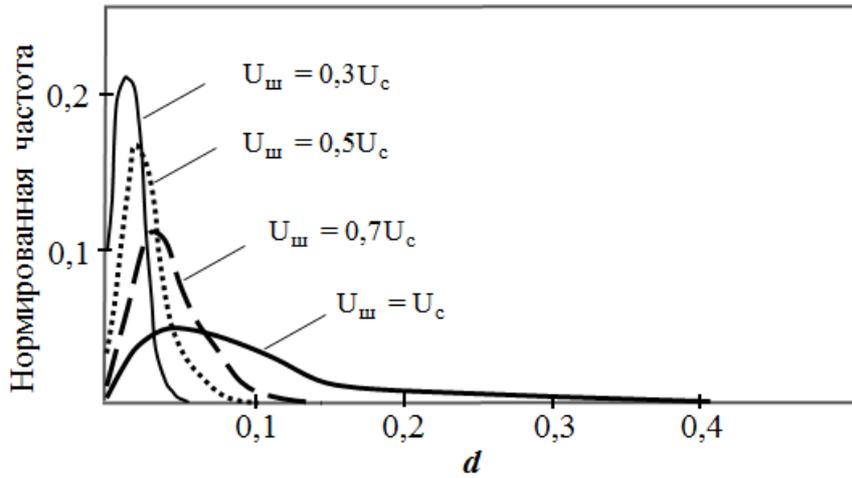


Рис. 5. Огибающие гистограмм распределения параметра d при различных уровнях шума.

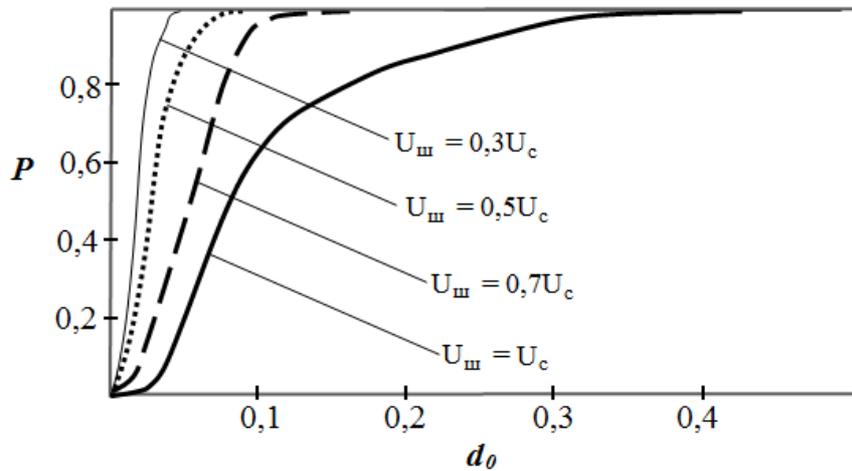


Рис. 6. Зависимости вероятности $P(d < d_0)$ при различных уровнях шума.

На рисунке 6 представлены зависимости вероятности $P(d < d_0)$ при различных уровнях шума.

Анализ рисунка показывает, что при уровнях амплитуды шума $U_{ш} < 0,5U_c$ ошибка оценки ширины спектра сигнала не превышает 0,1 (10% от истинного значения ширины спектра) с вероятностью 1. Однако повышение уровня шума до значения $U_{ш} = U_c$ приводит к снижению этой вероятности до 0,6.

Оценку точности определения ширины спектра принимаемого сигнала можно также провести на основе определения математического ожидания M и среднеквадратического отклонения (СКО) σ ошибки оценки.

На рис. 7–8 представлены результаты численных расчетов математического ожидания и СКО ошибок определения ширины спектра сигнала в зависимости от отношения сигнал/шум при различных значениях базы ЛЧМ-импульса. Центральная частота сигнала при моделировании составляла 1 ГГц.

Анализ полученных результатов показывает, что предлагаемая методика определения спектральных параметров ЛЧМ-импульса позволяет проводить достаточно точную оценку даже при отношении сигнал/шум порядка 1.

Отрицательные значения математического ожидания ошибки определения ширины спектра показывают, что происходит недооценка ширины спектра, что обусловлено сужением

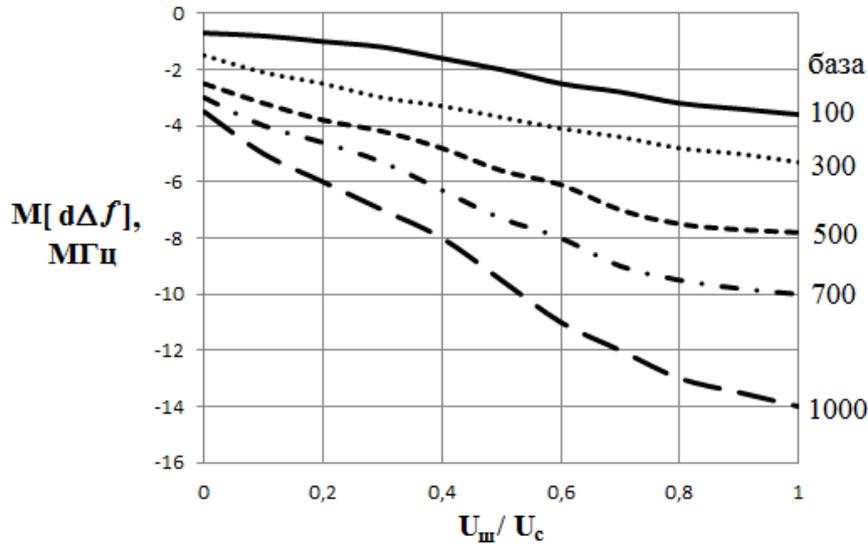


Рис. 7. Математическое ожидание ошибки определения ширины спектра сигнала в зависимости от базы ЛЧМ-импульса.

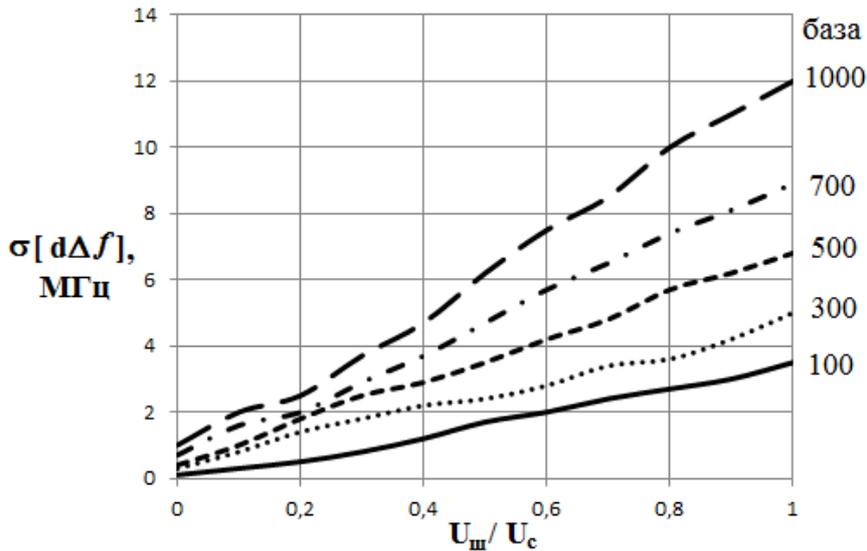


Рис. 8. СКО ошибки определения ширины спектра сигнала в зависимости от базы ЛЧМ-импульса.

спектра в результате действия операции сглаживания отсчетов спектра сигнала.

С увеличением базы сигнала происходит некоторое повышение МО и СКО рассматриваемых ошибок за счет увеличения ширины спектра.

Таким образом, предложена методика определения частотных параметров зондирующих ЛЧМ-импульсов с использованием процедур дискретного преобразования Фурье и сглаживания методом скользящей медианы. На основе численного моделирования произведена оценка статистических параметров ошибки определения ширины спектра исследуемого сигнала. Показано, что применение дополнительной операции сглаживания отсчетов сигналов после дискретного преобразования Фурье позволяет достаточно точно определять ширину спектра зондирующего импульса даже в условиях действия аддитивного шума высокого уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купряшкин, И. Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев. — М. : Радиотехника, 2020. — 280 с.
2. Федутинов Д. Беспилотники в сирийском конфликте [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.russiancouncil.ru/\(20.03.2020\)](http://www.russiancouncil.ru/(20.03.2020)).
3. Антипенский, Р. В. Проблемные вопросы и пути их разрешения при создании комплексов радиоэлектронного подавления перспективных бортовых радиолокационных станций на основе использования сигналоподобных помех / Р. В. Антипенский // Вестник ВУНЦ ВВС ВВА. — 2017. — № 3(30). — С. 43–48.
4. Аналитические сигналы в статистической радиотехнике / Р. В. Антипенский, В. Н. Поддубный, К. Ю. Ложкин, А. Е. Тюлин. — М. : Радиотехника, 2016. — 176 с.
5. Антипенский, Р. В. Методика оценки длительности ЛЧМ-радиоимпульса при цифровой обработке зондирующего сигнала бортовых РЛС / Р. В. Антипенский, А. Н. Катруша // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2017. — № 4. — С. 18–21.
6. Антипенский, Р. В. Сравнительная оценка точности цифровых способов определения длительности зондирующих сигналов бортовых РЛС / Р. В. Антипенский, А. Н. Катруша // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2018. — № 4. — С. 46–53.
7. Антипенский, Р. В. Методика оценки точности формирования сигналоподобных помех бортовым радиолокационным станциям / Р. В. Антипенский, Ю. Л. Козирацкий // Журнал СФУ. Техника и технологии. — 2017. — № 10 (4). — С. 475–483.
8. Афонский, А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. — М. : Солон-пресс, 2009. — 248 с.
9. Кирьянов, Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0 / Д. В. Кирьянов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.

REFERENCES

1. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Ryazantsev L.B. Small-sized multifunctional radars with continuous frequency-modulated radiation. [Kupryashkin I.F., Lixachev V.P., Ryazancev L.B. Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem]. Moscow, 2020, 280 p.
2. Fedutinov D. Drones in the Syrian conflict [Electronic resource]. [Fedutinov D. Bepilotniki v siriyjskom konflikte [Elektronnyy resurs]]. Mode of access: [http://www.russiancouncil.ru/\(20.03.2020\)](http://www.russiancouncil.ru/(20.03.2020)).
3. Antipenskiy R.V. Problematic issues and ways of their resolution in the creation of complexes of electronic suppression of promising onboard radar stations based on the use of signal-like interference. [Antipenskiy R.V. Problemnye voprosy i puti ix razresheniya pri sozdanii kompleksov radioelektronnogo podavleniya perspektivnykh bortovykh radiolokatsionnykh stanciy na osnove ispol'zovaniya signalopodobnykh pomex]. *Vestnik VUNC VVS VVA — Vestnik VUNTS VVS VVA*, 2017, no. 3(30), pp. 43–48.
4. Antipenskiy R.V., Poddubny V.N., Lozhkin K.Yu., Tyulin A.E. Analytical signals in statistical radio engineering. [Antipenskiy R.V., Poddubnyy V.N., Lozhkin K.Yu., Tyulin A.E. Analiticheskie signaly v statisticheskoy radiotexnike]. Moscow, 2016, 176 p.
5. Antipenskiy R.V., Katrusha A.N. Method for estimating the duration of LFM radio pulse in digital processing of the probing signal of onboard radar. [Antipenskiy R.V., Katrusha A.N. Metodika ocenki dlitel'nosti LChM-radioimpul'sa pri cifrovoy obrabotke zondiruyushhego signala bortovykh RLS]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushhie sistemy — Information-measuring and control systems*, 2017, no. 4, pp. 18–21.

6. Antipenskiy R.V., Katrusha A.N. Comparative evaluation of the accuracy of digital methods for determining the duration of probing signals on-Board Radar. [Antipenskiy R.V., Katrusha A.N. Sravnitel'naya ocenka tochnosti cifrovyykh sposobov opredeleniya dlitel'nosti zondiruyushhix signalov bortovykh RLS]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushhie sistemy — Information-measuring and control systems*, 2018, no. 4, p. 46–53.

7. Antipenskiy R.V., Koziratskiy Yu.L. Method of evaluating the accuracy of signal-like interference formation for onboard radar stations. [Antipenskiy R.V., Koziratskiy Yu.L. Metodika ocenki tochnosti formirovaniya signalopodobnykh pomex bortovym radiolokatsionnym stantsiyam]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii — Technique and technology*, 2017, no. 10 (4), pp. 475–483.

8. Afonskiy A.A., Diakonov V.P. Digital analyzers of spectrum, signals and logic. [Afonskiy A.A., D'yakonov V.P. Cifrovye analizatory spektra, signalov i logiki]. Moscow, 2009, 248 p.

9. Kiryanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. [Kir'yanov D.V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0]. Saint Petersburg, 2012, 432 p.

Антипенский Роман Валериевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: antipenskiy@yandex.ru.ru

Antipenskiy Roman Valerievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: antipenskiy@yandex.ru.ru

Катруша Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: alexholms@mail.ru

Katrusha Alexey Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: alexholms@mail.ru

Назаров Егор Евгеньевич, адъюнкт кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС ВВА, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: e.nazarov@rambler.ru

Nazarov Yegor Evgenievich, Postgraduate Officer of the Department of Radio Electronics of MSEC of AF AFA, Voronezh, Russian Federation
E-mail: e.nazarov@rambler.ru