

УДК 621.396

В.К. ВОЛОСЮК¹, В.И. БЛЕДНОВ², А.И. БАБЕНКО², В.В. ПАВЛИКОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Харьковский Университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ И ДИСПЕРСИИ ЧАСТОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА С ШУМОМ, ВЗВЕШЕННОГО НОВЫМИ ОКНАМИ КРАВЧЕНКО

Проанализировано изменение спектра сигналов при выполнении процедуры взвешивания (прямого произведения окна на сигнал во времени). Получены новые окна Кравченко на основании атомарных функций и Гауссова окна. Приведены результаты математического моделирования получения оценки смещения и дисперсии частоты радиолокационного сигнала при соотношении сигнал/шум 10 и 25 дБ для классических окон и построенных окон Кравченко.

атомарные функции, финитность, окна Кравченко, классические окна

Введение

Наличие помех в канале связи приводит к смещению амплитуды и частоты принятого колебания на выходе приемного устройства относительно истинных значений передаваемого сигнала.

Известно [1], что высокая разрешающая способность по дальности определяется видом зондирующего сигнала, и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\delta r = c / (2\Delta f), \quad (1)$$

где Δf – ширина спектра зондирующего сигнала; c – скорость распространения радиоволн.

В то же время высокое разрешение по угловой координате зависит от соотношения длины раскрытия антенны к длине волны [2, 3]:

$$\delta\theta = \lambda / d, \quad (2)$$

где λ – длина волны РЛС; d – размер антенны, а линейное разрешение на дальности R будет:

$$\delta l = R\delta\theta = R\lambda/d. \quad (3)$$

Таким образом, повышение разрешающей способности возможно лишь за счет увеличения длины антенны при заданной длине волны. Продольные и поперечные размеры летательного аппарата налагают ограничения на максимальный размер антенны.

Повысить разрешающую способность по угловой координате можно, применив режим синтеза апертуры.

Одной из таких задач является измерение с высокой точностью координат, направления, скорости движения и ускорения подвижной радиолокационной цели непосредственно на Земле или над Землей.

Скорость цели определяется частотой Доплера. При выполнении измерения частоты Доплера в полученную оценку входит и смещение частоты, вносимое шумом.

Из анализа литературы, посвященной вопросам спектрального анализа, следует, что величина смещения частоты сигнала с шумом рассмотрена не достаточно полно [4, 5]. При выполнении математического моделирования оценки смещения в различных шумовых обстановках с использованием различных окон было обнаружено, что величина измеренной частоты различна. Это вызвало потребность оценить величины смещения и дисперсии частоты для различных окон при разных соотношениях сигнала к шуму.

Окна и их характеристики

На практике приходится иметь дело с сигналами конечной длительности. Конечный сигнал можно

получить рассматривая бесконечный сигнал через некоторое окно (в самом простом случае прямоугольное), которое отлично от нуля лишь на некотором участке – носителе.

При использовании окон, преобразование Фурье (ПФ) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} S_{\omega\lambda}(j2\pi f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(t) w(t) \exp(-j2\pi ft) dt = \\ &= \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \lambda(t) w(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где $S_{\omega\lambda}(j2\pi f)$ – спектр взвешенного окон сигнала (процесс умножения на окно называется взвешиванием, т.к. исходной последовательности присваиваются весовые коэффициенты); τ – длительность окна; $w(t)$ – временное окно; $\lambda(t)$ – сигнал.

Далее в расчетах будем пользоваться левой частью формулы (4), подразумевая, что она отлична от нуля лишь в интервале $[-\tau/2; \tau/2]$.

Для простоты рассмотрим изменение спектра сигнала прямоугольным окном (все весовые коэффициенты в пределах носителя $[-\tau/2; \tau/2]$ равны единице).

Запишем процедуру взвешивания:

$$\begin{aligned} \lambda(t)w(t) &= S_{\lambda}(j2\pi f) * S_w(j2\pi f) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{\lambda}(j2\pi v) S_w(j2\pi(v-f)) dv = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{\lambda}(j2\pi(v-f)) S_w(j2\pi v) dv, \end{aligned} \quad (5)$$

где $S_{\lambda}(j2\pi f)$ и $S_w(j2\pi f)$ – спектры сигнала и окна соответственно.

$S_w(j2\pi f)$ известен, имеет вид $\sin(t)/t = \text{sinc}(t)$ (см. рис. 1, б). Если в качестве сигнала рассматривать синусоидальный сигнал бесконечной длительности $\sin(2\pi f_0 t)$, то $S_{\lambda}(j2\pi f)$ представляет собой две δ -функции на частотах $\pm f_0$ (см. рис. 1, а). В результате свертки (5), происходит накручивание $\text{sinc}(t)$ на δ -функции (рис. 1, в).

Для того, чтобы окна сравнивать между собой, приняты следующие параметры [6 – 8]:

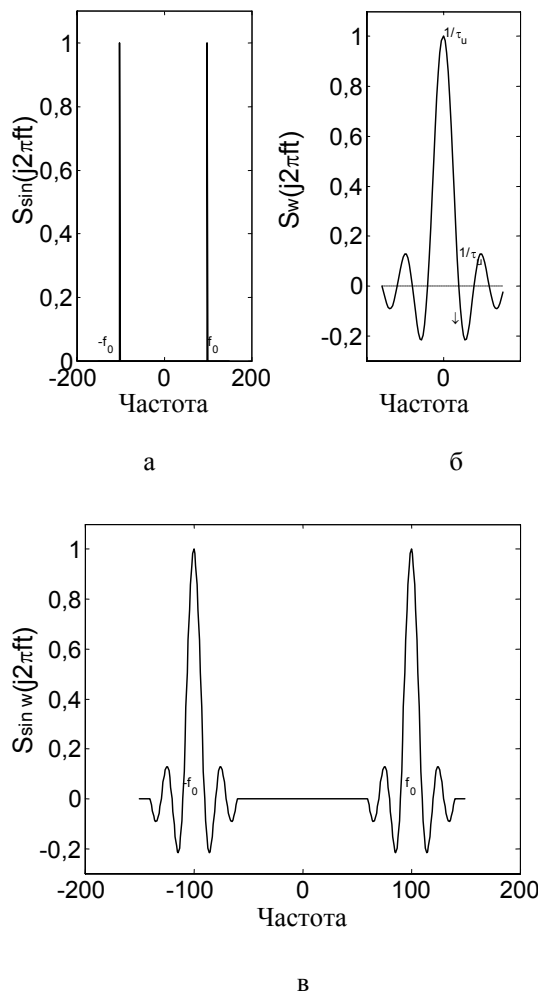


Рис. 1. Влияние окна на спектр сигнала

- эквивалентная шумовая полоса (ЭШП);
- корреляция перекрывающихся участков на уровне 50% (КПУ);
- паразитная амплитудная модуляция (ПАМ);
- максимальные потери преобразования (МПП, дБ);
- максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ, дБ);
- асимптотическая скорость спада боковых лепестков (ССБЛ);
- ширина окна на уровне -6дБ (ШП);
- когерентное усиление (КУ).

Далее будем характеризовать окна лишь по двум параметрам – УБЛ и ширине на уровне -6 дБ.

Окна Кравченко (Кравченко-Рвачева)

В настоящее время в радиотехнике наряду с классическими окнами (прямоугольным, треугольным, Хемминга, Хеннинга, Ханна, Чебышева, Тьюки, Гаусса) широкое применение находят новые окна Кравченко, разработанные на основе относительно нового математического аппарата атомарных функций [6, 7, 9 – 12].

На рис. 2 – 9 приведены окна Кравченко с их логарифмическими частотными характеристиками (ЛАЧХ) и параметрами – УБЛ и ширина на уровне –6 дБ (классические окна можно посмотреть во многих источниках, например [6 – 8]).

Как следует из приведенных рисунков, применение окон Кравченко гораздо разнообразит арсенал существующих окон, к тому же, они обладают всеми достоинствами атомарных функций [6, 7] – финитность, возможность формирования с их помощью полиномов и функций, возможность и простота извлечения производной любой степени, явное задание функций в спектральной области.

Смещение частоты при использовании окна в обработке зашумленных сигналов

Ранее было отмечено, что наличие помех в обрабатываемой последовательности приводит к смещению измеренных значений амплитуды и частоты. Интерес представляет смещение и дисперсия оценок значений частоты зашумленного сигнала при различных соотношениях сигнал/шум и использовании различных окон [13].

Математическое моделирование проводилось по схеме, приведенной на рис. 10.

Сигнал на входе приемного устройства можно представить в следующем виде:

$$u(t) = s(t, \lambda) + n(t), \quad (6)$$

где $s(t, \lambda)$ и $n(t)$ – соответственно сигнал и аддитивная помеха; λ – измеряемый параметр.

Уравнение (6) называется уравнением наблюдения.

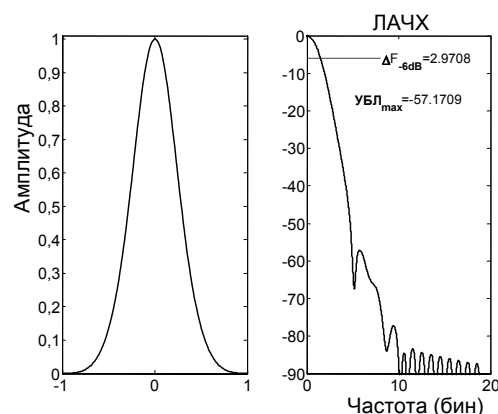


Рис. 2. Окно Кравченко K_2^4

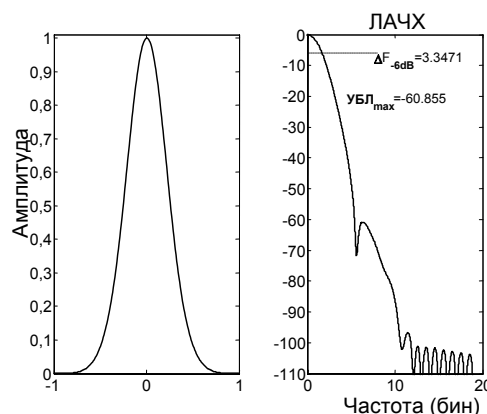


Рис. 3. Окно Кравченко-Гаусса $K_2^4 G_2$

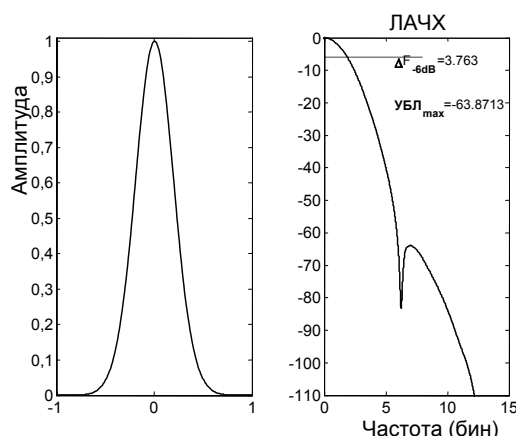


Рис. 4. Окно Кравченко-Гаусса $K_2^4 G_3$

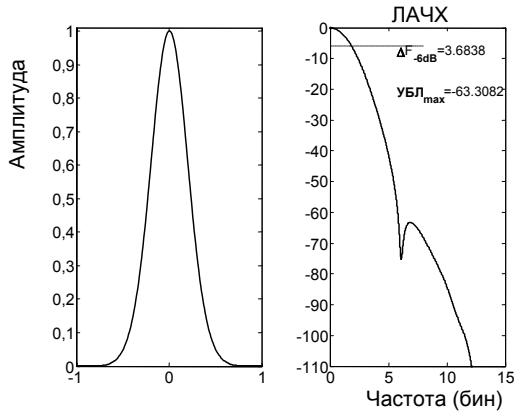


Рис. 5. Окно Кравченко-Гаусса $K_2 \Gamma_2^2$

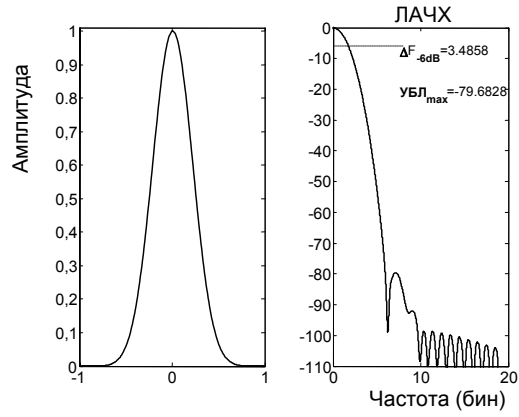


Рис. 8. Окно Кравченко-Гаусса $K_4 \Gamma_3$

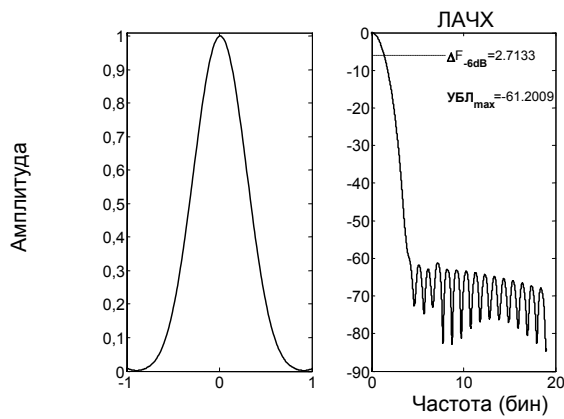


Рис. 6. Окно Кравченко K_4

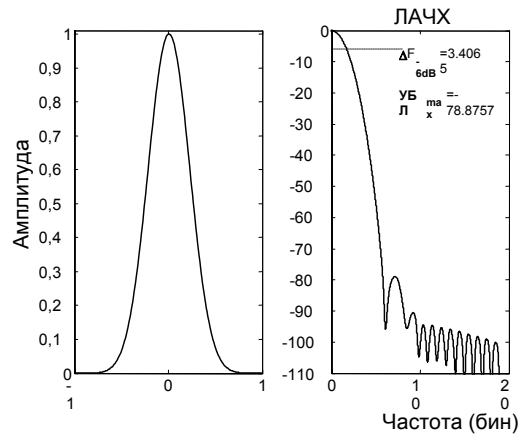


Рис. 9. Окно Кравченко-Гаусса $K_4 \Gamma_2^2$

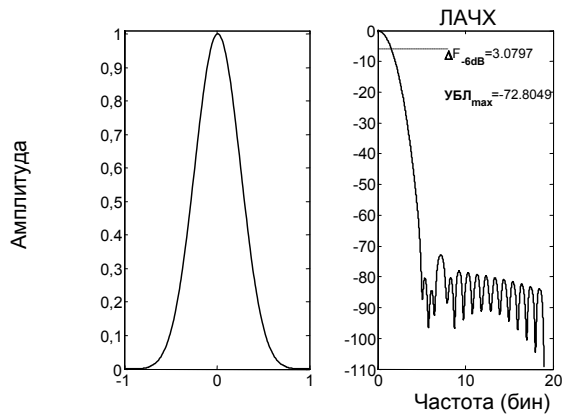


Рис. 7. Окно Кравченко-Гаусса $K_4 \Gamma_2$

Далее будет полагаться $s(t, \lambda) = a_s \sin(2\pi f t)$, $n(t) = a_n n(t)$ – гауссова помеха, где a_s и a_n – амплитуды сигнала и шума соответственно, $f = f_{ист}$ – истинная частота сигнала.

На рис. 10 введены следующие обозначения: Бл. ПФ – блок преобразования Фурье, выполняет процедуру перехода в частотную область; Бл. МО – блок вычисления математического ожидания; Бл. НМО – блок накопления значений измеренных частот и взятия математического ожидания; $f_{ист}$ – истинная частота (как ПФ сигнала без шума); \hat{f} – оцененное значение частоты; $\left[\hat{f} \right]$ – вектор оцененных значений частоты; $w(t)$ – оконные функции; $[m_f]$ – вектор математических ожиданий; $[D_f]$ – вектор дисперсий оценки; $[f_{см}]$ – вектор величин смещения оценки частоты.

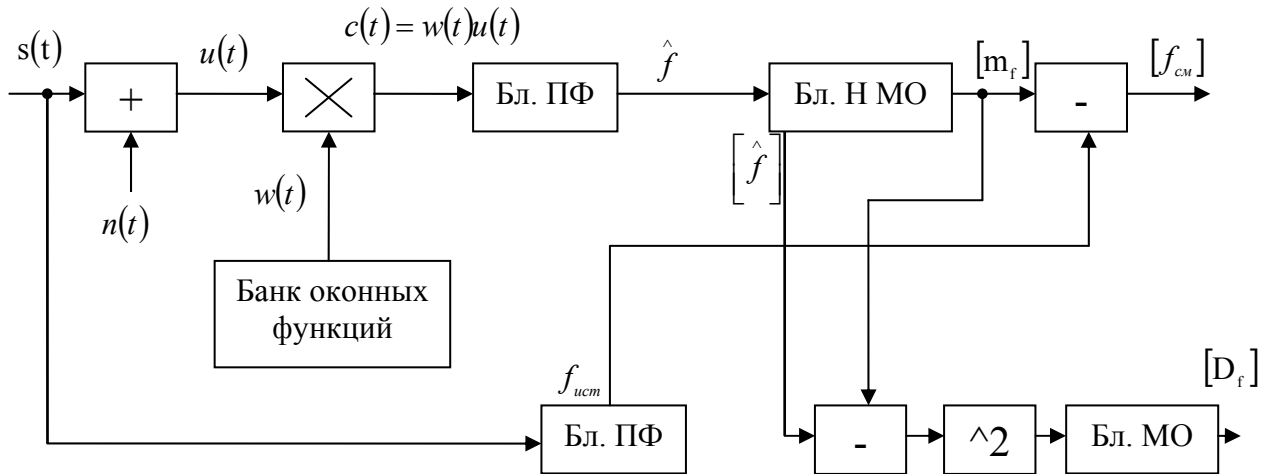


Рис. 10. Схема математического моделирования процесса измерения смещения и дисперсии частоты зашумленного сигнала

Таблица 1

Результаты математического моделирования оценки смещения и дисперсии частоты зашумленного сигнала для классических окон

№	Название окна	Математическое ожидание по 50 измерениям	Дисперсия	Смещение
Сигнал/шум=10дБ				
1	<i>Прямоугольное</i>	9,979971874	0,0001265	0,02002813
2	<i>Треугольное</i>	9,998390953	0,0001691	0,00160905
3	<i>Хемминга</i>	9,99334056	0,00017578	0,00665944
4	<i>Хеннинга</i>	9,998886089	0,00024427	0,00111391
5	<i>Ханна</i>	9,998985117	0,00024728	0,00101488
6	<i>Чебышева (50)</i>	9,992746396	0,00019975	0,0072536
7	<i>Тьюки (0,6)</i>	9,998093871	0,00020771	0,00190613
8	<i>Гаусса</i>	9,995222079	0,00019166	0,00477792
Сигнал/шум=25дБ				
1	<i>Прямоугольное</i>	10,00561995	0,10211146	-0,00561995
2	<i>Треугольное</i>	9,999678308	6,9527E-06	0,00032169
3	<i>Хемминга</i>	9,954620884	0,07985185	0,04537912
4	<i>Хеннинга</i>	10,04047756	0,08133796	-0,04047756
5	<i>Ханна</i>	10,03998242	0,07977222	-0,03998242
6	<i>Чебышева (50)</i>	9,995519161	6,6782E-06	0,00448084
7	<i>Тьюки (0,6)</i>	9,999777335	7,8451E-06	0,00022266
8	<i>Гаусса</i>	9,996608461	8,7865E-06	0,00339154

Таблица 2

Результаты математического моделирования оценки смещения и дисперсии частоты зашумленного сигнала для окон Кравченко

№	Название окна	Математическое ожидание по 50 измерениям	Дисперсия	Смещение
Сигнал/шум=10дБ				
1	$K2^4$	10,00086664	0,000577293	-0,000866635
2	$K2^4*Гаусса2$	10,00165885	0,000828141	-0,001658854
3	$K2^4*Гаусса3$	10,00284718	0,001196666	-0,002847182
4	$K2^4*Гаусса2^2$	10,00284718	0,001130963	-0,002847182
5	$K4^1$	9,999678308	0,000377635	0,000321692
6	$K4^1*Гаусса2$	10,00047053	0,000546031	-0,000470526
7	$K4^1*Гаусса3$	10,00195594	0,000810951	-0,001955936
8	$K4^1*Гаусса2^2$	10,00175788	0,000755093	-0,001757881
Сигнал/шум=25дБ				
1	$K2^4$	9,99997539	1,83968E-05	2,46103E-05
2	$K2^4*Гаусса2$	10,00056955	2,99684E-05	-0,000569553
3	$K2^4*Гаусса3$	10,00056955	3,87941E-05	-0,000569553
4	$K2^4*Гаусса2^2$	10,0003715	3,63229E-05	-0,000371499
5	$K4^1$	9,999480253	1,29543E-05	0,000519747
6	$K4^1*Гаусса2$	9,999876362	1,75437E-05	0,000123638
7	$K4^1*Гаусса3$	10,00056955	2,99684E-05	-0,000569553
8	$K4^1*Гаусса2^2$	10,00066858	2,67617E-05	-0,000668581

При расчетах принимались отношения сигнал/шум равные 10 и 25 дБ. Результаты моделирования для классических окон приведены в табл. 1, для окон Кравченко в табл. 2.

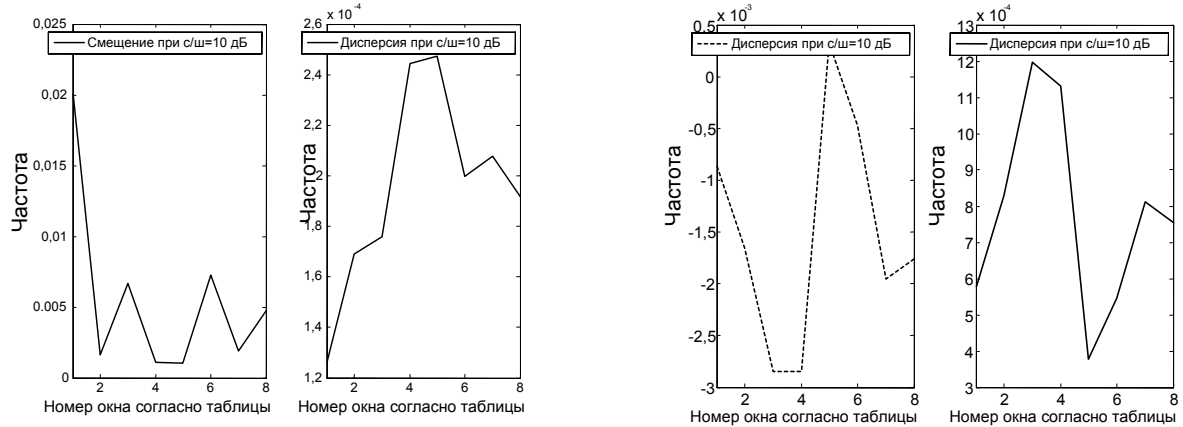
На рис. 11, 12 приведены значения смещение и дисперсия оценок частоты соответственно для классических окон и окон Кравченко при соотношении сигнал/шум 10 дБ (а) и 25 дБ (б)

В результате анализа полученных данных наблюдается закономерность – чем выше отношение сигнал/шум, тем точнее определяется частота и меньше дисперсия. При низких соотношениях сиг-

нал/шум предпочтительнее использовать классические окна, если сигнал/шум достаточный – отношение можно отдать окнам Кравченко, так как в этих условиях они обладают меньшей смещенностью и дисперсией получаемых оценок.

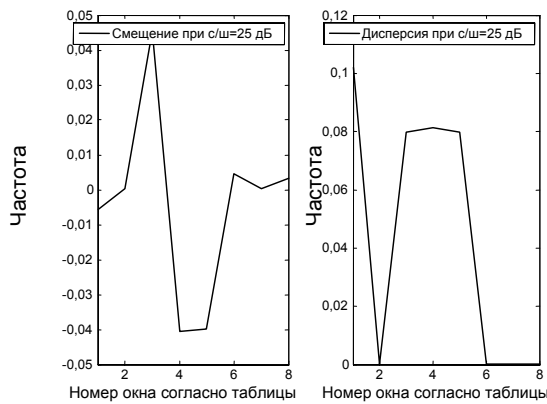
Выводы

В статье решена задача по измерению смещения и дисперсии частоты зашумленного радиолокационного сигнала при различных окнах. Приведены окна и их характеристики. Подробно рассмотрены новые окна Кравченко.

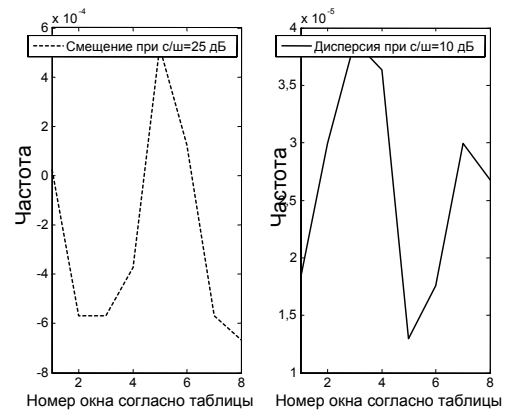


а

а



б



б

Рис. 11. Величина смещения и дисперсия для классических окон

Рис. 12. Величина смещения и дисперсия для окон Кравченко

Из анализа рис. 11, 12 можно сделать выводы, что окна Кравченко обладают меньшей смещенностью и дисперсией полученных оценок частоты, если сигнал шум достаточно велик (25 дБ). В случае, когда отношение сигнал шум невысокое предпочтение можно отдать классическим окнам.

В общем случае, когда стоит выбор между тем какие окна использовать, следует отдать предпочтение окнам Кравченко, так как они обладают всеми свойствами атомарных функций, более удобны при решении задач спектрального оценивания, их спектр известен в явном виде.

К тому же из одного семейства функций Кравченко можно получить множество различных окон (путем изменения параметра – сжатия и растяжения во времени, комбинации самих с собой или с клас-

сическими окнами), которые не уступают по своим параметрам классическим.

Математический аппарат атомарных функций достаточно прозрачен и не требует значительных вычислительных затрат.

Литература

1. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с. (Сер. Радиолокация).
2. Бледнов В.І., Павліков В.В. Аналіз характеристик синтезованих осьових антенних решіток при повздожньому синтезі // Радіоелектронні та комп'ютерні системи: Науково-технічний журнал. – 2005. – Вип. 2 (10). – С. 11-14.

3. Бледнов В.И. Особенности синтезированных антенн самолетных радиолокационных станций // Вестник науки и техники. – Х.: ООО «ХДНТ», 2003. – № 4 (15). – 66 с.
4. Марпл. -мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
5. Оценка дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.1./ Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
6. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям: Монография. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
7. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф. Современные методы аппроксимации в теории антенн. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. Кн. 1. – М.: ИПРЖР, 2002. – 72 с.
8. Хэррис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 1. – С. 60-97.
9. Кравченко В.Ф., Басараб М.А., Пересмеана Х. Спектральные свойства атомарных функций в задачах цифровой обработки сигналов // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 5. – С. 534-552.
10. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Тимошенко В.В. Атомарные функции в задачах синтеза неэквидистантных антенных решеток и сканирующих линейных антенн // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 6. – С. 676-689.
11. Применение атомарных функций в задачах в задачах весовой обработки радиолокационных сигналов / В.К. Волосюк, В.И. Бледнов, О.И. Бабенко, Ф.Ф. Мисик, В.В. Павликов // Матеріали другої науково-технічної конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. І.М. Кожедуба, 15-16 лютого 2006 року. Програма конференції та тези доповідей. – Х.: ХУ ПС, 2006. – 148 с.
12. Применение атомарных функций в задачах в задачах весовой обработки радиолокационных сигналов / В.К. Волосюк, В.И. Бледнов, О.И. Бабенко, В.В. Павликов // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 1 (7). – С. 46-52.
13. Волосюк В.К., Павликов В.В. Окна Кравченко в задачах весовой обработки зашумленных радиолокационных сигналов // Труды российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная дню радио. – М.: РНТОРЭиС, 2006. – Вып. LXI. – С. 37-39.

Поступила в редакцию 22.05 2006

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Лемешко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.