УДК 621.396.551.553

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТЫ ПАЧКИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ ФИЛЬТРОВОЙ СИСТЕМОЙ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЙ ПОПРАВКИ

Н.И. КРАВЧЕНКО, Д.В. ЛЕНЧУК

Здесь изучаются возможности уменьшения погрешностей оценок максимального правдоподобия частоты, обусловленные дискретностью съема информации при использовании многоканальных фильтровых систем, путем введения параболических интерполяционных поправок.

Ключевые слова: точность, оценка максимального правдоподобия, фильтр, параболическая интерполяция.

Упрощенная структурная схема типового фильтрового измерителя частоты пачки периодически следующих когерентных радиоимпульсов содержит набор взаимно расстроенных фильтров, согласованных с сигналом (рис. 1).

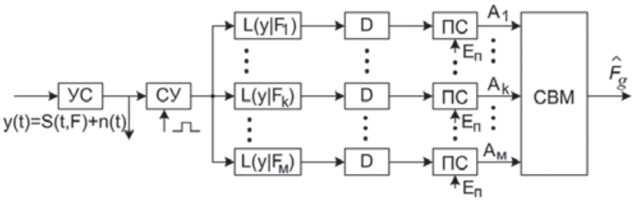

Рис. 1. Схема многоканального фильтрового измерителя частоты

Амплитудно-частотный спектр пачки из N прямоугольных когерентных зондирующих радиоимпульсов длительностью τ_u, следуемых с периодом $T=\dfrac{1}{F_n}$

$$s_з(t)=\sum_{k=0}^{N-1}E_з s_a(t-kT)\cos(\omega_0 t+\beta)$$

представляется следующим выражением

$$s_з(f)=E_з\tau_u\times$$
$$\times\left(\left|\frac{\sin\pi(f-f_0)\tau_u}{\pi(f-f_0)\tau_u}\right|\left|\frac{\sin\pi(f-f_0-kF_n)NT}{\sin\pi(f-f_0-kF_n)T}\right|\right).$$

Такой спектр является гребенчатым. Ширина спектра одного гребня ΔF, определяемая вторым сомножителем в круглых скобках, равна $\Delta F=\dfrac{1}{NT}=\dfrac{F_n}{N}.$

При расстоянии между соседними гребнями F_n общее число гребней в спектре равно скважности $\frac{1}{\tau_u}\Big/F_n=\dfrac{T}{\tau_u}=Q.$

Амплитудно-частотный спектр сигнала от точечного объекта, движущегося с радиальной скоростью v_r, с учетом (1) представляется в виде

$$S_{0T}(f)=E_0\tau_u\left|\frac{\sin\pi(f-f_0-F)\tau_u}{\pi(f-f_0-F)\tau_u}\right|\times$$
$$\times\left|\frac{\sin\pi(f-f_0-F-kF_n)NT}{\sin\pi(f-f_0-F-kF_n)T}\right|,$$

где $F=\dfrac{2v_r}{\lambda}$ — доплеровское смещение частоты сигнала.

При ненулевом доплеровском смещении частоты F все гребни спектра смещаются на величину F, которая в зависимости от скорости и направления может изменяться в пределах от $-\dfrac{F_n}{2}$ до $\dfrac{F_n}{2}$.

В фильтровых системах осуществляется обработка лишь одного главного гребня спектра сигнала. Поэтому при априори неизвестной величине F для надежного обнаружения и измерения частоты сигнала измеритель должен содержать набор из L согласованных фильтров с полосой ΔF, число которых при взаимной расстройке соседних фильтров будет $L=\dfrac{F_n}{\Delta}$. Если $\Delta=\Delta F$, то минимально необходимое число фильтров $L_{\min}=\dfrac{F_n}{\Delta}=\dfrac{F_n}{\Delta F}=N$.

Амплитудно-частотные характеристики трех соседних фильтров при взаимной расстройке по частоте на $\Delta=\Delta F$ показаны на рис. 2

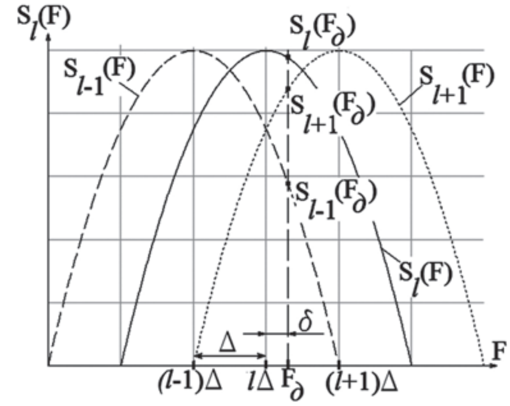

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Нетрудно показать, что операции, которые совершаются над принятыми сигналами пачки когерентных радиоимпульсов при их накоплении в фильтрах, аналогичны операциям при осуществлении дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Структурная схема цифрового измерителя частоты, в котором производятся операции ДПФ над квадратурными составляющими комплексной огибающей сигнала, изображена на рис. 3.

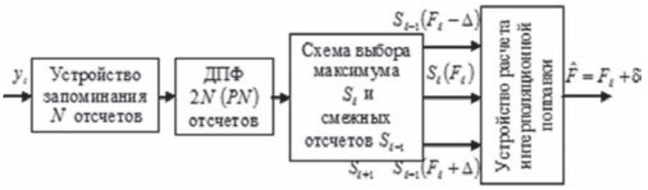

Рис. 3. Схема цифрового интерполяционного измерителя частоты

При подаче на вход измерителя пачки сигналов в настроенном фильтре амплитуда накопленного сигнала максимальна. За оценку частоты сигнала $\hat{F}$ принимают частоту настроенного фильтра F_l. Такую оценку $\hat{F}_{\text{ОМП}}$ называют оценкой максимального правдоподобия (ОМП). Очевидно, оценки ОМП могут принимать только дискретные значения, равные частотам настройки фильтров. Из рис. 2 видно, что когда расстройка между соседними фильтрами составляют величину Δ, то ошибки $\hat{F}_{\text{ОМП}}-F=\alpha$, обусловленные дискретностью съема, могут принимать значения в интервале от $-\frac{\Delta}{2}$ до $\frac{\Delta}{2}$. Так, при частоте повторения зондирующих импульсов $F_n=1000$ Гц, числе принимаемых импульсов в пачке $N=20$, взаимной расстройке соседних частотных каналов $\Delta=\frac{F_n}{N}=50$ Гц максимальная ошибка дискретности $\alpha_{\max}=\frac{\Delta}{2}=25$Гц. Тогда при длине волны $\lambda=10$см максимальная ошибка измерения скорости объекта локации составит $\delta_{v_r}=\frac{\lambda}{2}\alpha_{\max}=1{,}25$ м/с, а соответственно среднеквадратическая ошибка $\sigma_{v_r}=0{,}4$ м/с, что соизмеримо с допустимой ошибкой измерения скорости ветра доплеровскими метеорологическими РЛС [1]. Уменьшить ошибку дискретности можно путем уменьшения взаимной расстройки Δ за счет увеличения числа фильтров или, как указывается в работе [2, стр. 66], путем дополнения исходной N-мерной выборки принимаемых сигналов нулями, что позволяет при дискретно-временном преобразовании ДПФ повысить точность оценивания частоты спектральных пиков.

В связи с тем, что априори известна форма гребня спектра пачки когерентных импульсов, появляется возможность использовать другой, предложенный авторами [3], способ уменьшения ошибок дискретности, который состоит в переходе от оценок максимального правдоподобия $\hat{F}_{\text{ОМП}}$ к интерполяционным оценкам $\hat{F}_{\text{ОИ}}$, в качестве которых принимается величина $\hat{F}_{\text{ОИ}}=\hat{F}_{\text{ОМП}}+\delta$, где δ — поправка к оценке максимального правдоподобия, которую можно найти методом интерполяции значений сигналов в соседних частотных каналах.

Заметим, что зная амплитуды сигналов в двух соседних фильтрах (рис. 2) $S_l(F)=S(l\Delta)$ и $S_{l+1}(F)=S[(l+1)\Delta]$ или $S_{l-1}(F)=S[(l-1)\Delta]$, можно рассчитать F_∂, решив трансцендентное уравнение

$$\frac{S_l(F)}{S_{l+1}(F)}=\frac{\sin\pi(l\Delta-F_4)NT}{\sin\pi(l\Delta-F)T}\cdot\frac{\sin\pi[(l+1)\Delta-F]T}{\sin\pi[(l+1)\Delta-F]NT}.$$

С целью упрощения расчетов функцию $S_l(F)$, описывающую один l-ый гребень спектра сигнала, заменяют близкой к ней аппроксимирующей функцией. Из рис. 2 видно, что в окрестности вершины гребня сигнал в настроенном фильтре может быть описан такими функциями, как $\cos x$, $\frac{\sin x}{x}$, e^{-ax^2}, а также параболой y_0-ky^2. При исследовании использовалась функция в виде $S(F)=Y_0-kF^2\big|_{k>0}$.

Использование такой функции наиболее простое. Из выражения для $S(F)$ видно, что уравнение содержит три неизвестных (Y_0,k,F). Поэтому для нахождения F необходимо знать значения амплитуд и на выходе трех соседних частотных каналах.

Поскольку, как это видно из рис. 2, при числе фильтров N для произвольного значения F_∂ отсчеты $S_l(F_\partial)$, соответствующие главным гребням, будут одновременно лишь в двух фильтрах, то для осуществления параболической интерполяции число каналов должно быть не менее $2N$. На рис. 4 изображены три параболы, которыми аппроксимируются амплитудно-частотные характеристики трех соседних реальных фильтров, когда взаимная расстройка составляет $\Delta=\frac{F_n}{2N}=\frac{\Delta F}{2}$.

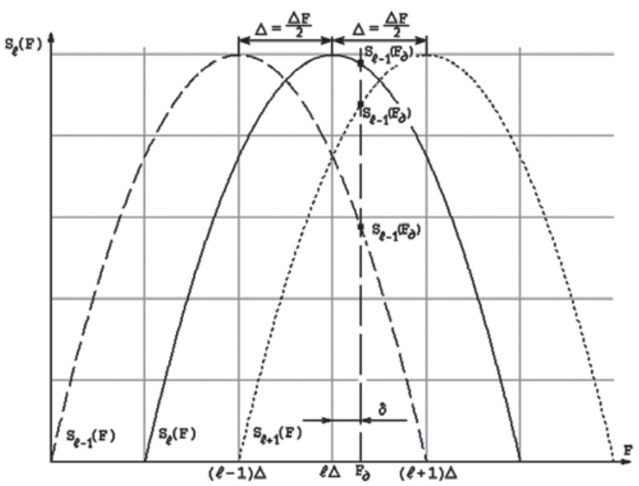

Рис. 4. Аппроксимация реальных АЧХ фильтров параболами

Будем считать, что при ДПФ рассчитывается $2N$ амплитуд для частот $l\frac{F_n}{2N}=l\Delta$, где $\Delta=\frac{F_n}{2N}$ — расстройка между соседними фильтрами. Пусть

$F_\partial = l\frac{F_n}{2N}+\gamma$, где γ – есть отклонение F_∂ от частоты настройки l-го фильтра, в котором сигнал максимален. Тогда

$$S_l(F)=\frac{\sin\pi\left(F_\partial - l\frac{F_n}{2N}\right)NT}{\sin\pi\left(F_\partial - l\frac{F_n}{2N}\right)T}=\frac{\sin\pi\gamma NT}{\sin\pi\gamma T};$$

$$S_{l+1}(F)=\frac{\sin\pi(\Delta-\gamma)NT}{\sin\pi(\Delta-\gamma)T};$$

$$S_{l-1}(F)=\frac{\sin\pi(\Delta+\gamma)NT}{\sin\pi(\Delta+\gamma)T}.$$

Такие значения получим при ДПФ, когда помехи отсутствуют. Предположим, что такие значения $S_l(F), S_{l-1}(F), S_{l+1}(F)$ имеют место, когда гребни спектров описываются параболами

$$S_l(F)=Y_0-k\delta^2;$$

$$S_{l+1}(F)=Y_0-k(\Delta-\delta)^2;$$

$$S_{l-1}(F)=Y_0-k(\Delta+\delta)^2.$$

Найдем соотношения для расчета поправки, зная $S_l(F), S_{l-1}(F), S_{l+1}(F)$. Для этого произведем преобразования

$$\begin{cases} S_l(F)-S_{l-1}(F)=k\Delta(2\delta+\Delta) \\ S_{l+1}(F)-S_{l-1}(F)=4k\delta\Delta, \end{cases}$$

откуда

$$\delta=\frac{\Delta}{2}\frac{S_{l+1}(F)-S_{l-1}(F)}{2S(F)-S_{l+1}(F)-S_{l-1}(F)}.$$

За искомую величину F_∂ принимаем величину $\hat{F}_{\text{ОПИ}} = F_l+\delta = l\frac{F_n}{2N}+\delta$, которую далее называем оценкой параболической интерполяции.

Эта оценка отличается от истинного значения $F_\partial = l\frac{F_n}{2N}+\gamma$. Для выяснения обоснованности параболической интерполяции установим близость параболической поправки δ к истинному значению γ, для чего произведем расчеты $S_l(F), S_{l-1}(F), S_{l+1}(F)$ для текущих значений γ и соответственно значения δ.

На рис. 5 представлена зависимость $\delta-\gamma=f(\gamma)$, из которой видно, что при использовании параболической аппроксимации гребня спектра параболическая поправка δ отличается от истинного значения γ в худшем случае, когда $\gamma \cong \frac{\Delta}{4}=\frac{F_n}{8N}$ при $N=8$, $F_n=1000$ Гц, всего на величину 1,5 Гц.

Об эффективности использования в многоканальных фильтровых системах измерения частоты оценок параболической интерполяции можно судить, сравнивая зависимости среднеквадратических ошибок ОМП и ОПИ от частоты, изображенных на рис. 6. При больших значениях коэффициента междупериодной корреляции метеосигналов и больших отношениях сигнал/шум ошибки ОМП, которые показаны сплошной линией, изменяются в зависимости от F_∂ почти по линейному закону и достигают для неблагоприятных частот $F_\partial=\frac{\Delta}{2}(2k-1)$ больших значений, равных $\frac{\Delta}{2}$. В то же время ошибки ОПИ слабо зависят от изменяемой частоты и почти в 5 раз меньше от максимальной ошибки ОМП. Это подтверждает целесообразность использования предложенного метода оценивания частоты. Успехи в развитии вычислительной технике увеличивают перспективность использования цифровых многоканальных корреляционно-фильтровых систем за счет перехода от оценок максимального правдоподобия к оценкам параболической интерполяции.

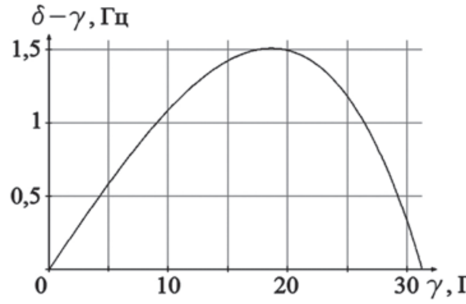

Рис. 5. График, характеризующий погрешности аппроксимации амплитудно-частотных характеристик согласованных фильтров параболами

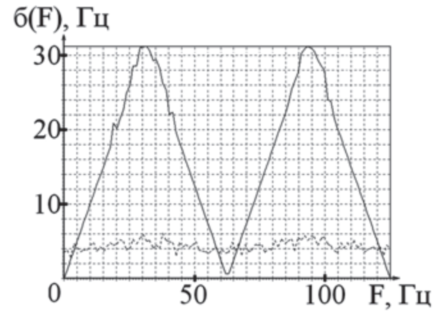

Рис. 6. Зависимость ошибок ОПИ и ОМП

Литература.

[1] Радиометеорология. Зарубежная радиоэлектроника. Ежемесячный технический и научно-технический журнал. – М.; 1993; № 4.

[2] С.Л. Марпл. Цифровой спектральный анализ и его приложение. – М.; МИР, 1990, – 584 с.

[3] Патент Кравченко М.І., Ленчук Д.В. Цифровий спосіб виміру частоти по N дискретним відлікам пачки когерентних сигналів. $N02Д^5 27'' - 245$. 28.02.2002 – заявлено. 19.02.2002 пріоритет. Рішення про видачу декларативного патенту 2002020822 від 31.07.2002.

Поступила в редколлегию 20.01.2011.

Кравченко Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ радиотехники ХНУРЭ. Область научных интересов: помехозащищенность РЛС, точность измерения параметров сигналов.

Ленчук Дмитрий Валерьевич, кандидат технических наук. Область научных интересов: помехозащищенность РЛС, точность измерения параметров сигналов

УДК 621.396.551.553

Підвищення точності оцінювання частоти пачки когерентних сигналів фільтровою системою шляхом уведення параболічної інтерполяційної поправки / М.І. Кравченко, Д.В. Ленчук // Прикладна радіоелектроніка: наук.техн. журнал. – 2011. Том 10. № 1. – С. 78–81.

Досліджуються можливості зменшення похибок оцінок максимальної правдоподібності частоти пачки когерентних сигналів, зумовлених дискретністю знімання інформації при використанні багатоканальних кореляційно-фільтрових систем шляхом введення параболічних інтерполяційних поправок.

Ключові слова: точність, оцінка максимальної правдоподібності, фільтр, параболічна інтерполяція.

Іл. 6. Бібліогр.: 3 найм.

UDC 621.396.551.553

Increasing accuracy of estimating the frequency of coherent signal burst by a filter system by means of introducing parabolic interpolation correction / N.I.Kravchenko, D.V.Lenchuk // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2011. Vol. 10. № 1. – P. 78–81.

The paper studies possibilities of reducing errors of estimating maximum frequency likelihood conditioned by the information retrieval discretization when using multichannel filter systems by introducing parabolic interpolation corrections.

Keywords: accuracy, estimate maximum likelihood, filter, parabolic interpolation.

Fig. 6. Ref.: 3 item.