

Слюсар Вадим Иванович  
доктор технических наук, профессор  
(Украина, [swadim@inbox.ru](mailto:swadim@inbox.ru))  
Троцько Александр Александрович  
(Украина)

Slyusar Vadym  
(Ukraine, [swadim@inbox.ru](mailto:swadim@inbox.ru))  
Trocko Aleksandr  
(Ukraine)

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО СУММЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СТРОБИРОВАНИЕМ ОТСЧЕТОВ АЦП.

## A ESTIMATION'S METHOD OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT WITH USE OF THE SUM OF HARMONIOUS SIGNALS WITH ADDITIONAL DECIMATION OF ADC.

В докладе предложен метод оценивания доплеровских сдвигов частоты поднесущих OFDM сигналов после дополнительного стробирования отсчетов аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сформированных по сумме нескольких пилот-сигналов. The paper considers of estimation's method of doppler frequency shift with use of the sum of harmonious signals with additional decimation of ADC.

При обеспечении связи с мобильными корреспондентами одним из важных этапов компенсации доплеровских смещений частоты поднесущих сигналов OFDM является оценивание величины доплеровского эффекта. Для этого на этапе вхождения в связь могут использоваться известные методы оценивания периода дискретизации АЦП [1, 2] при условии рассмотрения в качестве неизвестной не периода дискретизации, а частоты сигнала. Однако недостатком указанных методов является применение обработки непосредственно отсчетов АЦП, что увеличивает нагрузку на вычислительные средства. Поэтому для снижения требований к производительности вычислителей предлагается использовать операцию дополнительного стробирования отсчетов АЦП, например, вида [3]:

$$U_{cfrk_i}^c = \sum_{s=0}^{T-1} \left\{ U_s^c \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{2}\right) + U_s^s \cdot \sin\left(\frac{\pi s}{2}\right) \right\}, \quad U_{cfrk_i}^s = \sum_{s=0}^{T-1} \left\{ U_s^s \cdot \cos\left(\frac{\pi s}{2}\right) - U_s^c \cdot \sin\left(\frac{\pi s}{2}\right) \right\}, \quad (1)$$

где  $U_s^{c(s)}$  – квадратурные составляющие сигнала на входе цифрового фильтра дополнительного стробирования,  $i = \overline{0, I-1}$  – порядковый номер строба,  $T$  – количество отсчетов АЦП, накапливаемых в стробе (для устранения паразитного набега начальной фазы сигнала от строба к стробу должно быть кратно 4).

Оценивание доплеровского сдвига частоты поднесущих целесообразно выполнять на этапе вхождения в связь, используя сумму из нескольких пилот-сигналов. Определение их результирующих частот на приемной стороне может проводиться по серии временных отсчетов, полученных непосредственно в результате обработки (1). Однако более удобным является выполнение над выборкой откликов стробов операции быстрого преобразования Фурье (БПФ), что позволяет синтезировать линейку цифровых частотных фильтров.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цифрового фильтра, реализующего операцию (1), с точностью до фазового множителя описывается выражением:

$$Q(2\pi f_m) = \frac{\sin(\pi(f_m - f_c)T\tau)}{\sin(\pi(f_m - f_c)\tau)}, \quad (2)$$

где  $f_c$  – центральная частота АЧХ ЦФРК, при условии  $2\pi f_c \cdot \tau = \pi/2$ ,  $t$  – период дискретизации АЦП,  $T$  – количество отсчетов, накапливаемых в пределах одного строба.

Используя соотношение (2), для оценивания доплеровских сдвигов частоты следует решить систему уравнений, связывающих напряжения откликов частотных фильтров с искомыми неизвестными величинами. Для сокращения количества неизвестных при этом целесообразно формировать все пилот-сигналы когерентными, с одинаковой начальной фазой и известными соотношениями либо равными по величине амплитудами. Кроме того, важно использовать нормированную шкалу номиналов поднесущих, выразив подлежащую оцениванию частоту принятого  $m$ -го пилот-сигнала через реперную (опорную) частоту  $f_0$  в виде:

$$\omega_{dm} = 2\pi k_m f_0 \left(1 + \frac{V_r}{c}\right) = \omega_m \cdot d, \quad (3)$$

где  $k_m$  - нормирующий коэффициент,  $V_r$  - радиальная скорость мобильного объекта относительно приемного средства,  $c$  - скорость света.

Нетрудно заметить, что в выражении (3) величины  $W_m$  заранее известны и оценить нужно лишь одну неизвестную  $d$ , характеризующую радиальную скорость мобильного объекта.

С учетом введенных ограничений искомую систему уравнений для определения частот пилот-сигналов, имеющих одинаковые амплитуды, в пренебрежении шумами можно записать в виде:

$$W_i = a \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d),$$

где  $G_i(\omega_m d)$  - значение АЧХ  $i$ -го БПФ-фильтра на частоте  $\omega_m d$ ,

$Q(\omega_m d)$  - значение АЧХ цифрового фильтра дополнительного стробирования отсчетов АЦП на частоте  $\omega_m d$ ,  $M$  – количество пилот-сигналов,  $a$  – их амплитуда.

Для решения данной системы уравнений можно воспользоваться методом наименьших квадратов, минимизируя функционал невязок:

$$F = \sum_{i=1}^R \left\{ W_i^c - a_i^c \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right\}^2 + \sum_{i=1}^R \left\{ W_i^s - a_i^s \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right\}^2 = \min. \quad (4)$$

Поиск минимума (4) достигается максимизацией выражения

$$F_M = a_i^c \sum_{i=1}^R \left\{ W_i^c \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right\} + a_i^s \sum_{i=1}^R \left\{ W_i^s \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right\} = \max. \quad (5)$$

Подстановка в (5) полученных из (4) оценок квадратурных составляющих амплитуд позволяет получить окончательное соотношение для итерационного оценивания неизвестной величины  $d$ :

$$L = \left\{ \left( \sum_{i=1}^R W_i^c \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^R W_i^s \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right)^2 \right\} \left\{ \sum_{m=1}^M G_i(\omega_m d) \cdot Q(\omega_m d) \right\}^{-2}.$$

### Литература

1. Слюсар В.И. Измерение периода дискретизации АЦП по сигналу известной частоты // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.- 1998. - Том 41, № 5.- С. 30 - 33. - [http://www.slyusar.kiev.ua/IZV\\_VUZ\\_1998\\_05.pdf](http://www.slyusar.kiev.ua/IZV_VUZ_1998_05.pdf).

2. Слюсар В.И. Измерение периода дискретизации АЦП по сумме гармонических воздействий// Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.- 1999. - Том 42, № 9. - С. 19 - 25. - [http://www.slyusar.kiev.ua/IZV\\_VUZ\\_1999\\_9.pdf](http://www.slyusar.kiev.ua/IZV_VUZ_1999_9.pdf).

3. Слюсар В.И. Синтез алгоритмов измерения дальности  $M$  источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП.// Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника.- 1996. - Том 39, № 5. - С. 55 - 62. - [http://www.slyusar.kiev.ua/IZV\\_VUZ\\_1996\\_5.pdf](http://www.slyusar.kiev.ua/IZV_VUZ_1996_5.pdf).