ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АЛГОРИТМЕ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ

Е.В. Дереча^{1,2}, Д.Д. Привалов^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

²Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,
Омск, Российская Федерация

Рассматривается алгоритм Кея для оценки частоты несущей сигналов. Отмечается ухудшение характеристик алгоритма для сильно зашумленного сигнала и при большом частотном сдвиге. Предлагается способ повышения точности оценки на основе многоканальной обработки сигнала.

Ключевые слова: системы спутниковой связи, оценка частоты, искусственный спутник Земли.

APPLICATION OF MULTICHANNEL SIGNAL PROCESSING IN THE ESTIMATOR FREQUENCY

E.V. Derecha^{1,2}, D.D. Privalov^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

³Institute of Radiophysics and Physical Electronics OSC SB RAS, Omsk, Russian Federation

The article provides Kay's algorithm for estimating the carrier frequency of signals. Deterioration of the characteristics of the algorithm for a very noisy signal and for a large frequency shift is noted. A method is proposed for increasing the accuracy of estimation based on multi-channel signal processing.

Keywords: satellite communication system, frequency estimation, Earth-circling satellite vehicle.

Введение

Оценка частоты несущей сигналов является одним из необходимых этапов решения задачи синхронизации в радиоприемном устройстве [1; 2]. В низкоорбитальных системах спутниковой связи частотный сдвиг, обусловленный эффектом Доплера, может достигать 50 % и более относительно символьной скорости сигналов [3]. Дополнительной причиной, вызывающей частотное рассогласование передатчика КА и приемника абонентского терминала, является нестабильность частот их опорных генераторов.

Существует множество различных способов определения частоты сигнала. Однако в данной работе будет рассматриваться только алгоритм Кея [4–6] как один из наиболее простых способов оценки частоты, особенно по неманипулированной несущей, которая часто используется в пилотных вставках.

Описание алгоритма Кея

Будем считать, что на вход алгоритма поступает цифровой сигнал вида

$$r(k) = Ae^{j(2\pi\nu(kT_s+\tau)+\theta)} + n(k), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала, T_s – период дискретизации, ν – частота сигнала, θ – фазовый сдвиг, τ – временная задержка, $n(k)$ – шумовая компонента.

Правая часть (1) представляет собой дискретно-временную синусоиду с шумом, и задачей является получение оценки частоты этой синусоиды.

Рассмотрим алгоритм Кея [4–6]. Он относится к максимально правдоподобным. Оценка Кея выглядит следующим образом:

$$v_{ou} = \frac{1}{2\pi T_s} \sum_{k=0}^{L_0-2} w_k \arg\{r^*(k)r(k+1)\}, \quad (2)$$

где L_0 – длина наблюдаемой последовательности, w_k – сглаживающая оконная функция, которая служит для уменьшения дисперсии оценки

$$w_k = \frac{3}{2} \frac{L_0}{L_0^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{2k - L_0}{L_0} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

В алгоритме Кея можно использовать и прямоугольную оконную функцию $w_k = 1/L_0$, в этом случае оценка будет представлять собой арифметическое среднее аргументов.

При дальнейших рассуждениях мы будем руководствоваться зависимостью среднего значения оценки частоты от самой частоты (далее будем называть эту зависимость S-кривой). Семейство этих кривых для алгоритма Кея представлено на рис. 1.

Рис. 1. S-кривые для алгоритма Кея

Из этих зависимостей видно, что при наличии шумов кривая отклоняется от прямой при увеличении частотного сдвига. Причём чем больше шумов, тем сильнее это отклонение и тем при меньшем частотном сдвиге оно начинается. Такой вид кривой объясняется появлением в оценке значительных отклонений. Эти отклонения всегда в среднем занижают оценку по абсолютному значению.

Из вышеуказанных наблюдений вытекает цель данной работы: повысить точность оценки алгоритма Кея при больших частотных сдвигах и больших шумах.

Предлагаемый способ

Исходя из S-кривой, большие шумы и большой частотный сдвиг в совокупности искажают оценку в равной степени. Также, исходя из S-кривой, видно, что, имея оценку частоты, нельзя однозначно сказать, какой частотный сдвиг имеет сигнал. Например, для кривой при ОСШ = 7 дБ, оценку в $0,2F_s$ можно получить как для частотного сдвига в $0,21F_s$, так и в $0,42F_s$, причём ни один из этих частотных сдвигов не совпадает с оценкой. Из S-кривых следует, что наименьшая ошибка в оценке получается, когда частота входного сигнала близка к нулю.

В данной работе предлагается следующий способ использования S-кривой. Входной сигнал разделяется на несколько каналов, в каждом из которых у сигнала дополнительно

переносится частота на различную величину. Для получения оценки с наименьшей ошибкой достаточно выбрать тот канал, в котором оценка ближе всего к нулю. Однако здесь возникает сложность, связанная с тем, что S-кривая имеет нулевую оценку не только вблизи нуля, но и вблизи частот $\pm 0,5F_s$, где F_s – частота дискретизации. Таким образом, необходимо обработать выходы каналов, руководствуясь формой S-кривой, с целью выбора именно нужной частоты вблизи нуля. Очевидно, что чем большее количество каналов используется, тем точнее можно отследить форму S-кривой. Однако это связано с большими вычислительными трудностями.

Схема предлагаемого алгоритма приведена на рис. 2. Пример приведён для трёх каналов. В одном из каналов оценка алгоритмом Кея происходит непосредственно. В двух других каналах происходит предварительный перенос частоты на величину $\pm f$. При моделировании величина f принималась равной $0,4F_s$. Такой выбор величины f гарантирует, что хотя бы в одном из каналов частота не будет находиться на ниспадающем участке S-кривой.

Рис. 2. Схема предлагаемого алгоритма

Исходя из S-кривой видно, что на кривой существует определённая точка, после которой с увеличением частоты оценка не увеличивается, а уменьшается. Причём чем меньше ОСШ, тем ближе к нулю расположена эта точка.

В данной работе предлагается проводить анализ каналов, вычисляя разницу между их выходами. Самым важным является исключения участков S-кривой от 0,25 до 0,5 и от $-0,5$ до $-0,25$, то есть участков, где с увеличением входной частоты происходит уменьшение оценки. Таким образом, надо зафиксировать канал наиболее близкий к нулю.

Моделирование

При моделировании будем рассматривать 3 канала, L_0 примем равным 16. В качестве оконной функции использовалось прямоугольное окно. В результате компьютерного моделирования вышеуказанного алгоритма были получены следующие S-кривые, которые представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что предлагаемый алгоритм расширяет диапазон частот, в котором оценка корректна. У предлагаемого алгоритма практически отсутствует ниспадающая часть зависимости, она остаётся только при частотах $\pm 0,5F_s$. Также можно заметить, что при уменьшении ОСШ точность предлагаемого алгоритма падает, однако незначительно, и наклон кривой в целом сохраняется в 45 градусов. Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемый алгоритм способен расширить рабочий диапазон частот практически до теоретического предела, что и следовало ожидать, так как происходит перебор каналов.

Рис. 3. S-кривые предлагаемого алгоритма (сплошная линия) в сравнении с исходным (пунктирная линия): *а* – ОСШ = 3,5 дБ, *б* – ОСШ = 7 дБ, *в* – ОСШ = 15,5 дБ

Также интерес представляет СКО оценки предлагаемого алгоритма. Сравнение СКО исходного алгоритма и предлагаемого приведены на рис. 4.

Из зависимостей на рис. 4 видно, что при низких ОСШ предлагаемый алгоритм имеет немного большую СКО, чем исходный. Это можно объяснить тем, что при выборе значения с одного из каналов, из-за присутствия шумов может произойти выбор из канала с большим частотным отклонением. Однако, уже начиная с частоты $0,22F_s$ предлагаемый алгоритм сравнивается по СКО с исходным, а при дальнейшем увеличении частотного сдвига имеет СКО в разы меньше, чем у исходного.

Рис. 4. СКО предлагаемого алгоритма (сплошная линия) в сравнении с исходным (пунктирная линия) для различных частотных сдвигов:
 $a - 0,1F_s$, $б - 0,2F_s$, $в - 0,3F_s$, $г - 0,4F_s$

Заключение

Как показали результаты проведенных исследований, введение двух дополнительных каналов обработки сигнала позволяет улучшить некоторые характеристики алгоритма Кея. В свою очередь, это повышает вычислительную сложность алгоритма и ухудшает некоторые другие характеристики алгоритма Кея. Таким образом, на основе представленного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Использование двух дополнительных каналов, сдвинутых по частоте на $0,4F_s$ от исходного, позволяет расширить диапазон адекватно определяемых алгоритмом Кея частот практически до величин $\pm 0,5F_s$. При этом в указанном диапазоне S-кривая предлагаемого алгоритма имеет линейный характер.

2. Из-за того что предлагаемый алгоритм расширяет диапазон корректно определяемых частотных сдвигов, это ведёт к тому, что СКО в предлагаемом алгоритме при увеличении частотного сдвига оказывается меньше чем у исходного алгоритма. Однако такая картина наблюдается только для частот, больших $0,22F_s$.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. 2-е изд., испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. М.: Техносфера, 2011. 904 с.
3. Камнев В.Е., Черкасов В.В., Чечин Г.В. Спутниковые сети связи: учеб. пособие. М.: Альпина Паблишер, 2004. 536 с.
4. Umberto Mengali, Aldo N. D'Andrea. Synchronization techniques for digital receivers // Plenum Press, New York, 1997. 529 p.
5. Kay S.A. A Fast and Accurate Single Frequency Estimator // IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Proc. 1989. Vol. ASSP-37, Dec. P. 1987–1990.
6. Дереча Е.В., Привалов Д.Д. Применение алгоритмов оценки частоты несущей GMSK-сигналов для систем спутниковой связи // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 4 (31). С. 61–68.