Е.А. Столбова, Л.С. Грошева, Т.В. Гордяскина
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛАЙСИНГА В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА TMS320C5510

В статье рассматривается практическое исследование явление элайсинга (наложения спектров) при цифровой обработке сигналов цифровым сигнальным процессором TMS320VC5510, причины возникновения этого явления и способы борьбы с ним.

Постановка задачи

В настоящее время в современных системах связи, мультимедийных устройствах, радиолокационном и радионавигационном оборудовании широко применяется цифровая обработка сигналов (ЦОС).

В процессе дискретизации аналоговых сигналов на практике возникает проблема, связанная с потерей информации при восстановлении аналогового сигнала [1]. Для корректного восстановления аналогового сигнала, подвергнутого дискретизации, необходимо проводить оцифровку информационного сигнала в соответствии с теоремой Котельникова.

$$\omega_{д} \geq 2\ \omega_{верхн} \tag{1}$$

где $\omega_{д}$ – частота дискретизации аналогового сигнала,
$\omega_{верхн}$ – верхняя частота спектра аналогового сигнала, подвергаемого дискретизации.

Спектр дискретного сигнала представляет собой бесконечную сумму копий спектров аналогового сигнала X_a, сдвинутых друг относительно друга на частоту дискретизации $\omega_{д}$. Выражение для спектра дискретизированного сигнала [1]:

$$X(e^{j\omega T}) = \frac{1}{T}\sum_{m=-\infty}^{\infty} X_a\left[j\left(\omega + m\frac{2\pi}{T}\right)\right], \tag{2}$$

где $m2\pi/T = m\omega_{д}$, $m = 0, \pm1, \pm2,\ldots$

Для того чтобы сигнал эффективно (без потери информации) восстанавливался, нужно избежать элайсинга (aliasing – возможное наложение спектров аналоговых сигналов, подвергнутых дискретизации). Иллюстрация процесса формирования спектров дискретизированных сигналов при различных значениях частоты дискретизации $\omega_{д}$ аналогового сигнала приведена на рис. 1.

На практике в современной цифровой схемотехнике элайсинг устраняют двумя способами:

1) повышением частоты дискретизации $\omega_{д}$ аналогового сигнала;

2) применением антиэлайсинговых фильтров низкой частоты, подавляющих сигналы с частотой выше $\omega_{д}/2$.

Рассмотрим влияние частоты дискретизации $\omega_{д}$ на спектр дискретного сигнала, полагая, что спектр аналогового сигнала, подвергнутого дискретизации $X_{а}(j\omega)$, с верхней частотой $\omega_{в}=2\pi f_{в}$ (Рис. 1а).

– Если частота дискретизации $\omega_{д} \geq 2\ \omega_{в}$ (Рис. 1б, 1в), то в основной полосе частот $(0, \omega_{д}/2)$ спектры аналогового и дискретного сигналов совпадают (не перекрываются).

– Если частота дискретизации $\omega_д < 2\ \omega_в$, происходит наложение спектров (элайсинг), поэтому в основной полосе частот спектр дискретного сигнала представляет собой искаженный спектр аналогового сигнала (Рис. 1г).

Искажение спектра проявляется в виде возникновения дополнительной спектральной составляющей, зеркального отображения сигнала относительно частоты $\omega_д/2$. Эффект наложения спектров означает потерю возможности точного восстановления сигнала по его отсчетам, т.е. сигнал будет восстановлен с потерей информации (искажен). Данные выводы согласуются с теоремой Котельникова.

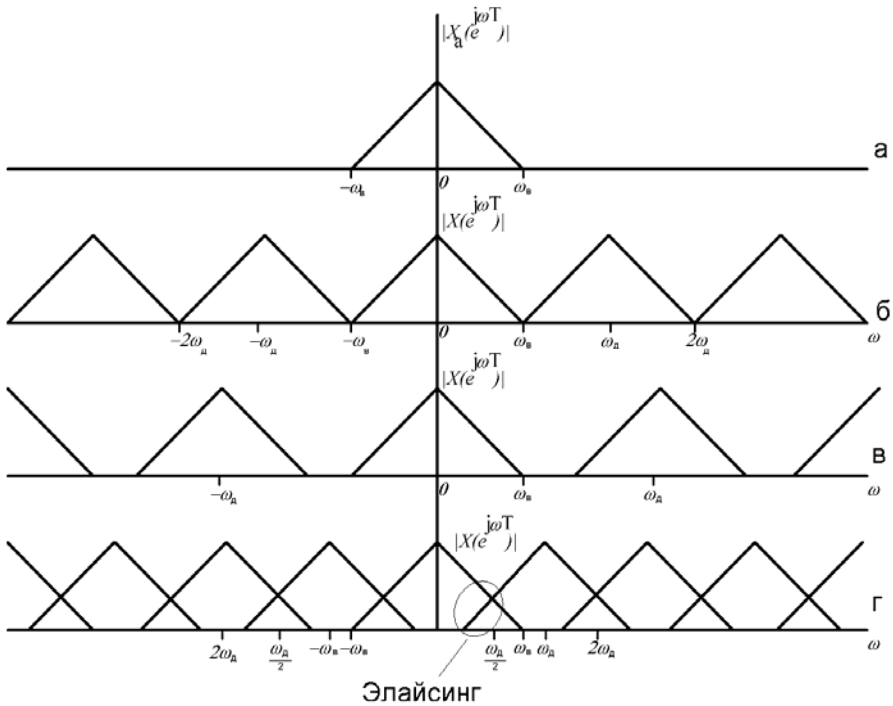

Рис. 1. Примеры спектров аналогового и дискретизированных сигналов

Практические исследования

Практическое подтверждение теории дискретизации аналоговых сигналов проводится с использованием цифрового сигнального процессора (ЦСП) TMS320C5510 [2]. Схема установки для проведения моделирования явления элайсинга содержит кодек AIC23, обеспечивающий аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов с частотой дискретизации 48 кГц (рис. 2).

При исследовании элайсинга используются два способа:

1) В цифровую систему подается аналоговый гармонический сигнал с частотой выше $f_д/2$, то есть $f_{сигнала} > 24$кГц.

2) В цифровую систему подается аналоговый гармонический сигнал с частотой ниже $f_д/2$, но принудительно понижается частота дискретизации – в системе проводится децимация.

В первом способе на входной канал платы DSK подается гармонический сигнал с частотой больше $f_д/2$ с генератора GFG-8255A (программное генерирование сигнала ПК с помощью генератора тона – NCH Ton Generator с частотой выше 20 кГц не используется). Для сигнального процессора TMS320C5510 в оболочке **Code Compose Studio** разработана программа по исследованию входного и выходного сигналов, ос-

циллограммы и спектры которых отображаются на цифровом осциллографе PCS-500 [3].

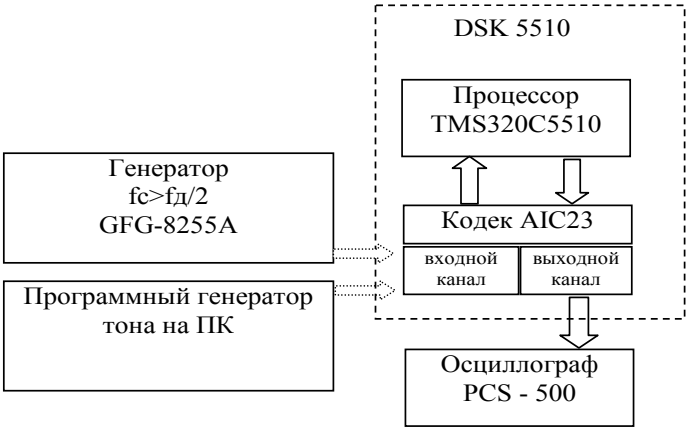

Рис. 2. Схема лабораторной установки

При подаче сигнала с частотой $f_c \leq 24$ кГц в спектре выходного сигнала элайсинга нет, сигнал восстанавливается без потери качества (Рис. 3).

Рис. 3. Спектр выходного сигнала при f_c = 24 кГц

При увеличении частоты входного сигнала до 25 кГц, в выходном спектре, кроме спектральной составляющей на частоте 25 кГц, появляется дополнительная гармоника – помеха, зеркально отраженная от частоты $f_д/2$=24кГц, на частоте 23 кГц, то есть, в системе наблюдается явление элайсинга (Рис. 4).

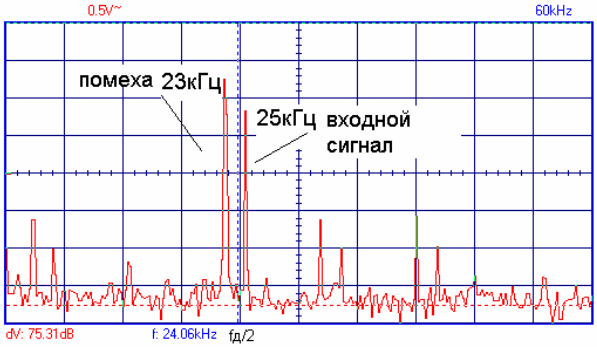

Рис. 4. Спектр выходного сигнала при f_c = 25 кГц

При дальнейшем увеличении частоты входного сигнала до 28 кГц, происходит постепенное уменьшение амплитуды спектральных составляющих на выходе (Рис. 5).

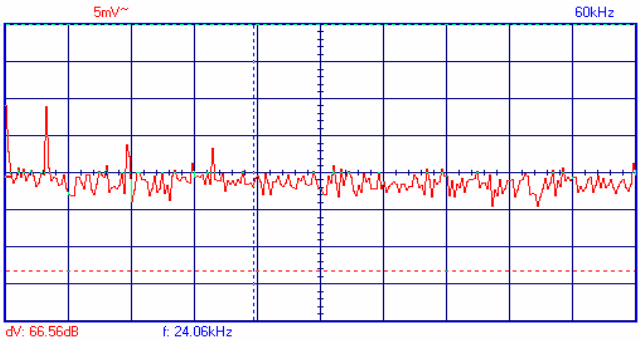

Рис. 5. Спектр выходного сигнала при f_c = 28 кГц

Анализируя работу лабораторной установки можно сделать следующий вывод: плата DSK снабжена антиэлайсинговым фильтром низких частот с $f_{среза}$≈24кГц, подавляющим все частоты свыше 28 кГц. В диапазоне частот от 24 до 28 кГц сигнал подавляется не полностью, но отражённая помеха не будет попадать в звуковой диапазон частот, т.к. $f_{помехи}$>20кГц и она не будет прослушиваться.

Во втором способе на входной канал платы DSK подается гармонический сигнал звукового диапазона (200 Гц – 20 кГц) с ПК. Для формирования сигнала с присутствием явления элайсинга необходимо, чтобы не выполнялась теорема Котельникова (количество выборок за период гармонического колебания было меньше 2), то есть, в системе необходимо провести децимацию, искусственно снизить $f_д$. Частота дискретизации $f_д$, при которой появляется элайсинг, вычисляется по приведенной ниже методике.

Количество выборок *kv* при стандартной частоте дискретизации:

$$kv = \frac{f_{дискр.ст.}}{f_{сигнала}}, \tag{3}$$

где $f_{дискр.ст}$ – стандартная частота дискретизации кодека 48 кГц, $f_{сигнала}$ – частота исследуемого гармонического сигала.

Интервал децимации сигнала:

$$I_{дец} = \frac{kv}{2} + 2. \tag{4}$$

Таким образом, в процессе дискретизации будет выбираться каждая точка через промежуток, равный половине количества выборок при стандартной частоте дискретизации плюс 2 точки (количество добавляемых точек может быть большим), что обусловлено необходимостью искусственного нарушения теоремы Котельникова.

Частота дискретизации, при которой появляется элайсинг:

$$f_{дискр} = \frac{f_{дискр.ст.}}{I_{дец}} \tag{5}$$

Проведём расчет явления элайсинга для гармонического сигнала с частотой $f_{сигнала}$ = 1000Гц.

kv=48000/1000=48 – количество выборок сигнала за период;

$I_{дец}$=48/2+2 – интервал децимации сигнала;

$f_{дискр}$ = 48000/26=1846 – искусственно сниженная частота дискретизации;

$f_{дискр.с}$ /2=1846/2= 923Гц – частота, относительно которой происходит зеркальное отражение помехи;

$f_{сигнала} - f_{дискр.с}$ /2= 1000–923=77Гц;

$f_{помехи}$=923–77=846 Гц – частота, на которой проявится помеха (наблюдается элайсинг).

Проведенный расчет подтвержден натурным экспериментом, результат которого представлен на рис. 6.

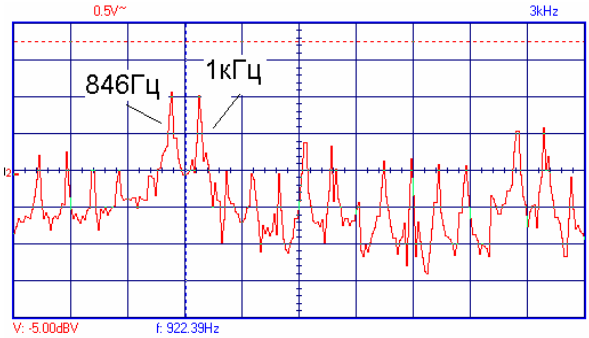

Рис. 6. Спектр выходного сигнала при децимации

Выводы

Приведенная в статье методика может быть использована в качестве лабораторной работы в дисциплине «Прикладные задачи цифровой обработки сигналов», внедрение которой в учебный процесс позволит студентам провести не только теоретическое изучение, но и практическое исследование фундаментальных основ цифровой обработки сигналов на примере явления элайсинга.

Список литературы:

[1] Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьёва Е.Б. Учебное пособие. «Основы цифровой обработки сигналов».

[2] Грошева Л.С., Мерзляков В.И. Учебно-методические указания. «Цифровые сигнальные процессоры в радиооборудовании. Архитектура и прикладные задачи»

[3] Гордяскина Т.В., Грошева Л.С. Учебно-методические указания Основы цифровой обработки сигналов в радиоэлектронном оборудовании

В.Ф. Сухова

ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

ЦИКЛ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО РАДИООБОРУДОВАНИЯ»

В статье рассматриваются вопросы, связанные с организацией цикла лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника» на базе промышленного стенда «Электроника»: методы сборки схем, примерный перечень заданий, требования, предъявляемые к оформлению отчета.

Данный цикл лабораторных работ, предназначен для изучения раздела «Схемотехника цифровых устройств» дисциплины «Схемотехника».

На кафедре уже выполняется цикл лабораторных работ по цифровой схемотехни-