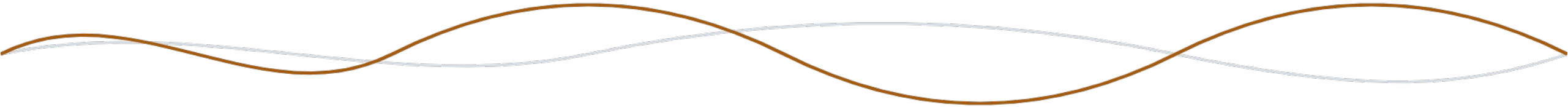
ELC2142 – Сигналдарды цифрлық өңдеу технологиясы

15-дәріс

Сигналдарды сандық өңдеу процессорлары

MAC-операция · тұрақты және өзгермелі нүкте · Гарвард архитектурасы · сақиналы және биттік-кері адрестеу · Motorola DSP5600x / DSP96002



КІРІСПЕ

Дәрістің мақсаты мен жоспары

Мақсат

Сигналдарды сандық өңдеу процессорларының (ССӨП) архитектуралық ерекшеліктерін, MAC-операцияны, жадты ұйымдастыру мен адрестеу режимдерін меңгеріп, алгоритмнің орындалу уақытын бағалай білу.

1. ССӨП жалпы сипаттамасы және негізгі сериялары
2. MAC-операция, тұрақты және өзгермелі нүкте
3. Гарвард архитектурасы, жад және адрестеу
4. Motorola DSP5600x және DSP96002 отбасылары
5. Өнімділікті бағалау және ассемблерде бағдарламалау

ССӨП-ты жалпы процессордан не ерекшелейді?

МАС бір тактіде

R ← R + a·x — көбейту мен жинақтау бір командалық циклде.

Жадқа көп рет қол жеткізу

Бір тактіде команда және екі операнд оқылады (P, X, Y шиналары).

Арнайы адрестеу

Сақиналы буфер, биттік-кері адрестеу, модульдік арифметика.

Аппараттық цикл

REP / DO командалары — цикл үшін қосымша такт жоқ.

Чиптегі енгізу-шығару

АЦТ/ЦАТ интерфейстері, сериялық порттар, ПДП контроллері.

Қолдану

Сөйлеуді кодтау, модемдер, аудио, кескін қысу, радиолокация, антенналық тор.

15.1 · КЕСТЕ 15.1

ССӨП-тың негізгі сериялары

Серия	Арифметика	Сөз, бит	10^6 команда/с	Өндіруші
ADSP-21xx	тұрақты	16	33.3	Analog Devices
ADSP-21xxx	өзгермелі	32	40.0	Analog Devices
DSP16xx	тұрақты	16	70.0	AT&T
DSP32xxx	өзгермелі	32	20.0	AT&T
DSP5600x	тұрақты	24	40.0	Motorola
DSP563xx	тұрақты	24	80.0	Motorola
DSP96002	өзгермелі	32	20.0	Motorola

Екі топ

Тұрақты нүкте — арзан, аз қуат, 16/24 бит. Өзгермелі нүкте — кең динамикалық диапазон, 32 бит.

Тренд

Қазіргі TI C6000, ADI SHARC, Cortex-M DSP кеңейтімдері — көпядролы, VLIW, SIMD.

Көбейту-жинақтау — ССӨП-тың жүрегі

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)\, x(n-k)$$

$A \leftarrow A + X_0 \cdot Y_0$ — бір тактідегі МАС

$b_A = 2b + \lceil \log_2 N \rceil$ — аккумулятор разрядтылығы

$24 \times 24 \to 48$ бит $+ 8$ қорғаныс бит $= 56$ бит (DSP5600x)

FIR, 4 коэффициент (15.4)

y[n] = h0·x[n] + h1·x[n−1] + h2·x[n−2] + h3·x[n−3] — 4 МАС: X регистрлерінде x, Y регистрлерінде h.

ЖФТ «көбелегі» (15.3)

U ← u + w·v; V ← u − w·v — да МАС-қа келтіріледі.

Түйін: ШИС, СИС, корреляция, ЖФТ, матрицаларды көбейту — бәрі МАС тізбегіне келтіріледі; сондықтан МАС жылдамдығы (MMACS) ССӨП-тың басты көрсеткіші.

Тұрақты және өзгермелі нүкте

Формат	Динамикалық диапазон	Мысал
16 бит тұрақты	96 дБ	Q15, қанығу арифметикасы
24 бит тұрақты	144 дБ	DSP5600x, аудио
32 бит тұрақты	193 дБ	жоғары дәлдік
32 бит өзгермелі (IEEE-754)	≈ 1529 дБ	DSP96002, SHARC

Ереже

Динамикалық диапазон ≈ 6.02·b дБ: әр қосымша бит 6 дБ береді. Өзгермелі нүкте масштабтауды автоматтандырады, бірақ кристалл ауданы мен қуат көп.

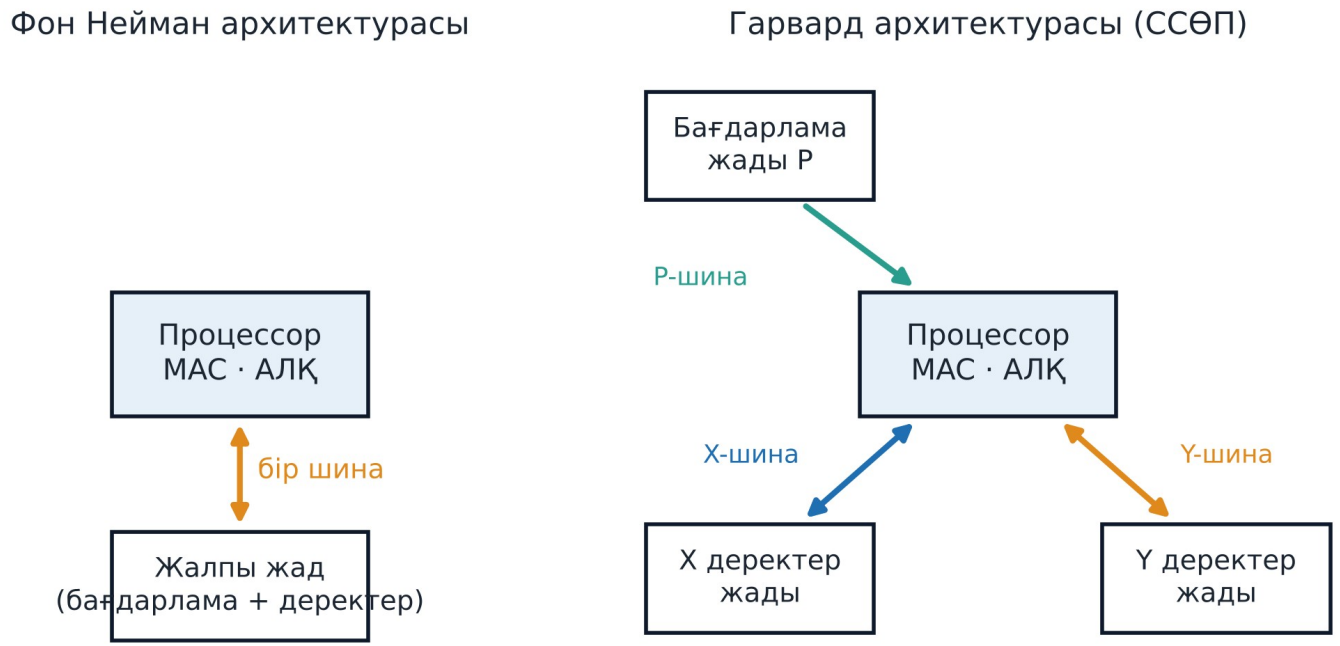
Толып кетумен күрес

Қорғаныс биттері (8 бит аккумуляторда)

Қанығу (saturation) режимі

Масштабтау: блоктық өзгермелі нүкте

Гарвард архитектурасы: жадқа бірнеше рет қол жеткізу



Фон Нейман

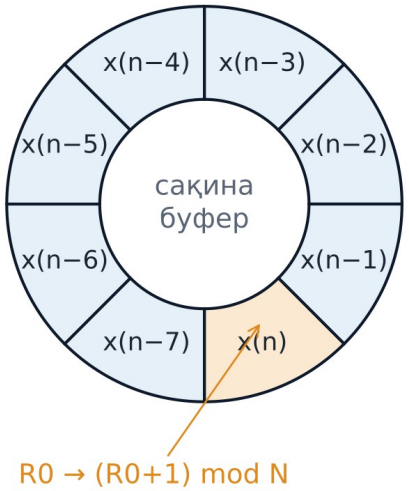
Бір шина — команда мен дерек кезекпен: МАС-қа 3 жад циклі.

Модификацияланған Гарвард

P, X, Y жады қатар: 1 тактіде команда + 2 операнд.

Нәтиже: DSP5600x-те P, X, Y жадтары мен үш адрестік генератор (AGU) МАС-ты әр тактіде деректермен қамтамасыз етеді.

Сақиналы және биттік-кері адрестеу



Биттік-кері адрестеу (N = 8)

```
0 = 000  →  000 = 0
1 = 001  →  100 = 4
2 = 010  →  010 = 2
3 = 011  →  110 = 6
4 = 100  →  001 = 1
5 = 101  →  101 = 5
6 = 110  →  011 = 3
7 = 111  →  111 = 7
```

Сақиналы буфер

R0 ← (R0 + 1) mod N: ескі үлгі жаңасымен ауысады, деректер жылжытылмайды. FIR кідіріс сызығы үшін.

Биттік-кері

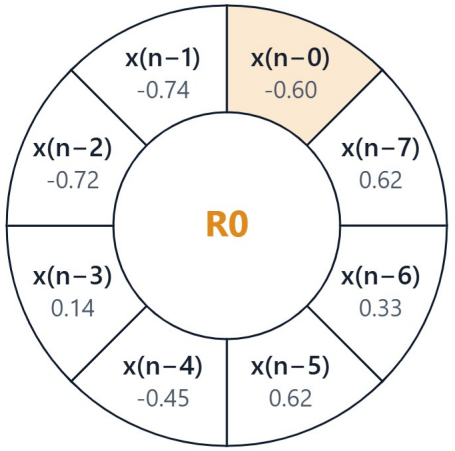
Негіз-2 ЖФТ кірісін/шығысын қайта реттеу: 1 = 001 → 100 = 4.

Адрестеу режимдері: тікелей, регистрлік, жанама (R), постинкремент (R)+, индекстік (R+N), модульдік және биттік-кері — барлығы AGU-да, ALU-ды жүктемейді.

АНИМАЦИЯ · МАС ЖӘНЕ САҚИНАЛЫ БУФЕР

СИС сүзгісі ССӨП-та қалай орындалады?

сақиналы буфер X (N = 8)

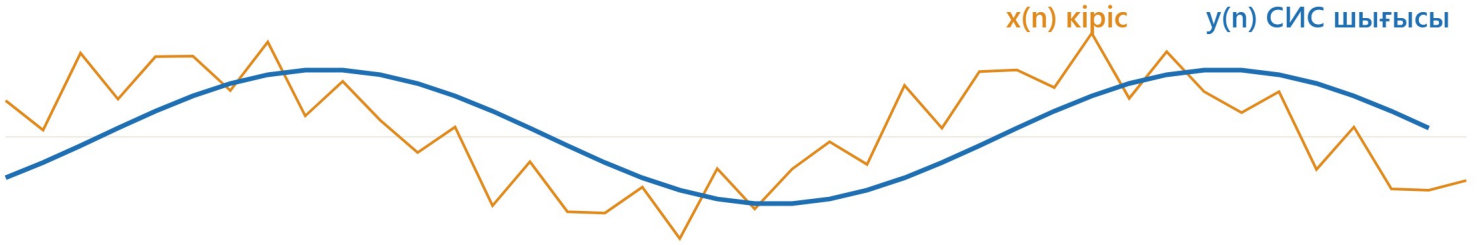


коэффициенттер Y: h(k)

0.02	0.07	0.16	0.25	0.25	0.16	0.07	0.02

такт 1 / 8: A ← A + X0·Y0

X0 = -0.602 Y0 = 0.02 ⇒ A = -0.012



Байқаңыз: әр шығыс үлгісіне N = 8 МАС такті кетеді; R0 шеңбер бойымен жылжиды, деректер жадта көшірілмейді — сондықтан цикл N + 7 тактіде орындалады.

DSP5600x және DSP96002 архитектуралық ерекшеліктері

DSP5600x (24 бит, тұрақты нүкте)

24×24 → 48 бит көбейткіш, екі 56 бит аккумулятор (A, B): 48 + 8 қорғаныс бит

X және Y деректер жады + функциялар кестелері сақталған екі ROM (синус, μ/A заңы)

Үш адрестік генератор, аппараттық DO/REP циклдері

Сериялық SSI/SCI порттары, хост интерфейсі

DSP96002 (32 бит, өзгермелі нүкте)

IEEE-754 single/double, 96 бит он регистрлік файл

Жеті ішкі шина: P, X, Y, ғаламдық және ПДП шиналары

ПДП контроллері басқа ресурстарды пайдаланбайды

Қосқыш-азайтқыш ЖФТ көбелегін бір тактіде орындайды

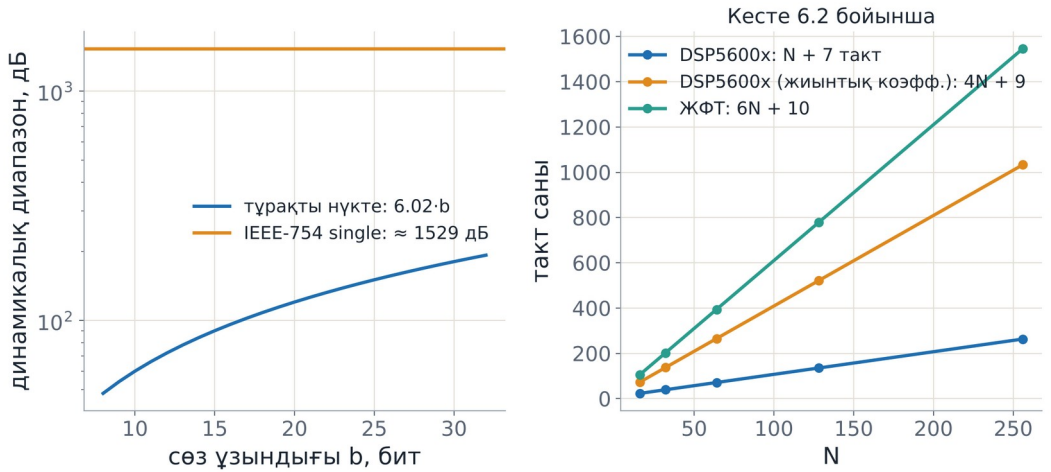
Түйін: DSP96002 архитектурасы DSP5600x-ке ұқсас — бағдарламалық үйлесімділік пен өзгермелі нүктенің кең диапазоны біріктірілген.

DSP5600x-те алгоритмдердің орындалу уақыты

Алгоритм	Сөз	Такт
СИС, N-ші рет (нақты коэф.)	7	N + 7
СИС, N-ші рет (комплекс коэф.)	12	4N + 9
Бір биквадрат буын	7	7
N биквадрат буын	11	4N + 8
ЖФТ, негіз-2 көбелегі	15	6N + 10

N = 64, 40 MIPS

СИС: 71 такт = 1.78 мкс; комплекс СИС: 265 такт = 6.6 мкс; 64 биквадрат: 264 такт.



Қорытынды (Кесте 6.2): такт саны N-ге сызықтық тәуелді; MAC-тың бір тактіде орындалуы мен аппараттық цикл тұрақты қосымша шығынды 7–10 тактіге дейін азайтады.

САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Сигнал өңдеуге арналған платформаларды салыстыру

Платформа	MAC/с	Қуат	Икемділік	Қолдану
Жалпы CPU (x86, ARM-A)	орташа	жоғары	өте икемді	ДК, сервер, мобильді
ССӨП (DSP)	жоғары	төмен	бағдарламалық	аудио, модем, сөйлеу
Микроконтроллер + DSP	орташа	өте төмен	бағдарламалық	IoT, сенсорлар
ПЛИС (FPGA)	өте жоғары	орташа	аппараттық	SDR, радар, 5G
ASIC	максимал	минимал	жоқ	сериялық құрылғылар

Таңдау ережесі: ССӨП — бағдарламалау икемділігі мен энергия тиімділігінің ымырасы; өте жоғары өткізу қабілеті керек болса — FPGA, жаппай өндіріс — ASIC.

ЕСЕП 1 · ШЕШІМІМЕН

СИС сүзгісінің максимал іріктеу жиілігі

Шарты

DSP5600x, 40 MIPS (1 такт = 25 нс). N = 64 коэффициентті нақты СИС сүзгісі. Ең үлкен іріктеу жиілігін табыңыз. Кесте 6.2 бойынша.

Шешуі

1. Такт саны: N + 7 = 64 + 7 = 71.

2. Бір үлгіге уақыт: 71 · 25 нс = 1.775 мкс.

3. fд max = 1 / 1.775 мкс ≈ 563 кГц.

4. Аудио (48 кГц) үшін ресурстың 48/563 ≈ 8.5 %-ы ғана қажет.

Жауабы: fд ≤ 563 кГц; 48 кГц-те бір ССӨП ≈ 11 осындай сүзгіні қатар орындай алады.

Резерв

Үзілістер мен енгізу-шығаруға 10–20 % уақыт қалдыру керек.

ЕСЕП 2 · ШЕШІМІМЕН

Аккумулятордың қажетті разрядтылығы

Шарты

24 бит деректер мен коэффициенттер, N = 256 МАС жинақталады. Толып кетпеуі үшін аккумулятор қанша бит болуы керек? 16 бит АЦТ-ның динамикалық диапазоны қандай?

Шешуі

1. Көбейтінді: 24 + 24 = 48 бит.

2. 256 қосылғыш: $\lceil \log_2 256 \rceil = 8$ қорғаныс бит.

3. b_A = 48 + 8 = 56 бит — DSP5600x аккумуляторы дәл осындай.

4. 16 бит АЦТ: D = 6.02·16 + 1.76 ≈ 98 дБ.

Жауабы: 56 бит аккумулятор; 16 бит АЦТ ≈ 98 дБ (кванттау шуы бойынша).

Неге 8 бит?

256 = 2^8 рет қосқанда ең жаман жағдайда қосынды 2^8 есе өседі.

DSP56000 ассемблерінде СИС сүзгісі

DSP56000 ассемблері

```
; R0 → x (сақина), R4 → h
move #XBUF,r0
move #HCOEF,r4
move #N-1,m0 ; модуль N
move m0,m4
movep y:INPUT,x:(r0)
clr a x:(r0)+,x0 y:(r4)+,y0
rep #N-1
mac x0,y0,a x:(r0)+,x0 y:(r4)+,y0
macr x0,y0,a (r0)-
movep a,y:OUTPUT
```

C тілі

```
// C эквиваленті (сақиналы буфер)
buf[idx] = x_in;
acc = 0;
for (k = 0; k < N; k++) {
acc += h[k] * buf[(idx - k) & (N-1)];
}
idx = (idx + 1) & (N-1);
y_out = acc;
```

rep + mac: бір тактіде көбейту, жинақтау және екі операндты параллель оқу. Цикл N + 7 такт.

ЗЕРТХАНАЛЫҚ ТАПСЫРМА

ССӨП-та СИС сүзгісін іске асыру және бағалау

1. Нұсқа бойынша N, fд және сүзгі түрін алыңыз; коэффициенттерді MATLAB-та есептеңіз.
2. Коэффициенттерді Q15/Q23 форматына кванттап, АЖС өзгерісін бағалаңыз.
3. СИС сүзгісін ассемблерде (немесе C + intrinsics) сақиналы буфермен жазыңыз.
4. Симуляторда такт санын өлшеп, Кесте 6.2-мен салыстырыңыз.
5. Тұрақты және өзгермелі нүкте нәтижелерінің қатесін салыстырыңыз.

Есепте болуы тиіс

- Коэффициенттер кестесі
- Кванттаудан кейінгі АЖС
- Бағдарлама листингі
- Такт саны мен fд max
- Қорытынды

Қолдану салалары

Аудио кодектер, модемдер, белсенді шуды басу, радиолокация, медициналық құрылғылар.

ӨЗІН-ӨЗІ ТЕКСЕРУ

Жылдам тест

1. ССӨП-тың басты операциясы?

А) бөлу Б) МАС В) түбір алу

2. Гарвард архитектурасының артықшылығы?

А) бір шина Б) команда мен деректерді қатар оқу В) арзан

3. ЖФТ үшін қай адрестеу керек?

А) тікелей Б) биттік-кері В) индекстік

4. DSP5600x аккумуляторы неше бит?

А) 24 Б) 48 В) 56

5. DSP5600x-те N-ші ретті нақты СИС неше тактіде орындалады?

А) N Б) N + 7 В) 4N + 9 Г) 6N + 10

Жауаптары: 1 — Б, 2 — Б, 3 — Б, 4 — В, 5 — Б

ҚОРЫТЫНДЫ

Дәрістің негізгі тұжырымдары

01 ССӨП — MAC-ты бір тактіде орындайтын, сигнал өңдеуге бейімделген бағдарламаланатын процессор.

02 Гарвард архитектурасы мен P, X, Y шиналары бір тактіде команда және екі операнд береді.

03 Сақиналы және биттік-кері адрестеу СИС пен ЖФТ-ны деректерді көшірусіз орындауға мүмкіндік береді.

04 DSP5600x: 24 бит деректер, 56 бит аккумулятор; N-ші ретті СИС — N + 7 такт (40 MIPS-те N = 64 үшін 1.78 мкс).

ТЕРМИНДЕР СӨЗДІГІ

Қазақша — орысша — ағылшынша

Қазақша	Русский	English
Сигналдарды сандық өңдеу процессоры	цифровой сигнальный процессор	digital signal processor (DSP)
Көбейту-жинақтау	умножение с накоплением	multiply-accumulate (MAC)
Аккумулятор	аккумулятор	accumulator
Тұрақты / өзгермелі нүкте	фиксированная / плавающая точка	fixed / floating point
Сақиналы буфер	кольцевой буфер	circular buffer
Биттік-кері адрестеу	бит-реверсная адресация	bit-reversed addressing
Қанығу арифметикасы	арифметика с насыщением	saturation arithmetic

БЕКІТУ · 15-ДӘРІС

Бақылау сұрақтары

1. ССӨП дегеніміз не және оның қолданылу аясы қандай?
2. Тұрақты және өзгермелі нүктелі арифметиканың айырмашылығы.
3. MAC-операциясының мәні; ол қандай алгоритмдерде қолданылады?
4. Гарвард архитектурасының артықшылықтарын атаңыз.
5. Жанама адрестеу режимдерінің түрлерін түсіндіріңіз.
6. DSP5600x және DSP96002 ерекшеліктері қандай?
7. Толып кетумен күресу тәсілдері қандай?