

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Füüsika Instituut

Heiki Laaniste

**Ioonide lennuaja spektromeetri elektroonikasüsteemi
täiustamise võimalused**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: prof. Ergo Nõmmiste

Tartu 2010

Sisukord

Sisukord	2
Sissejuhatus	3
Ioonide lennuaja massspektroskoopia	4
Lennuaja massspektromeetrite põhiomadused	5
Ioonide lennuaja võrrandid	5
Ruumfokusseerimise tingimus (space focusing condition)	7
TOF süsteemi elektroonika tööpõhimõte	10
Digitaliseerijad ja aeg-digitaalmuundajad	12
GaGe digitaliseerijad	13
CobraMax CompuScope Family	14
Signatec digitaliseerijad	15
PX1500-4	17
PDA1000	17
Caen digitaliseerijad	18
NIM - N6751	19
VME - VX1751	20
VME - V1751	21
VME - V1742	21
DT5761	22
Highland Technology aeg-digitaalmuundajad	23
V660	23
Agilent Technology aeg-digitaalmuundajad	24
Agilent U1050A	24
Acam aeg-digitaalmuundajad	25
TDC-GPX	25
Kokkuvõte	26
Summary	28
Kasutatud kirjandus	29

Sissejuhatus

Käesolev referatiivne uurimistöö käsitleb Turu Ülikoolile kuuluva, aga põhiliselt Lund-i Ülikooli MAX laboratooriumis kasutatava ionide lennuaja spektromeetri (Time of Flight, TOF) elektroonikasüsteemi täiustamise võimalusi, keskendudes sealjuures sellest süsteemist lähtuvate signaalide digitaliseerija uurimisele ja võimalike uute ning paremate digitaliseerijate otsimisele.

Töö annab sissejuhatava ülevaate ionide lennuaja mõõtmisest massspektroskoopia meetodikaga ja massspektrometrite põhiomadustest ning MAX laboris asuva TOF elektroonikasüsteemi olemusest.

Internetiuuringu põhjal tehtud suurem osa tööst sisaldab informatsiooni ja analüüsi erinevate tootjate poolt pakutavate digitaliseerijate ning aeg-digitaalmuundajate kohta. Võrdlevad tabelid annavad ülevaate mõnedest kõige kiirematest saadaolevatest (ja ka mõnest peatses tulevikus saadaolevast) seadmetest, mida oleks võimalik kasutada massspektroskoopia mahukate eksperimendiandmete kogumiseks ja salvestamiseks.

Ioonide lennuaja massspektroskoopia

Ioonide lennuaja mass-spektroskoopia on meetodika, mis võimaldab uurida ergastatud aatomite ja molekulide seisundite relaksatsiooniprotsesse, mis järgnevad nende selektiivsele ergastusele sünkrotronkiirgusega ionisatsiooniläve läheduses. Täielik ionisatsioonispekter (i.k *total ion yield*) sisaldab informatsiooni fotoionisatsiooni ristlõikest, mis on proportsionaalne neeldumis-spektriga. Sellest saab ka informatsiooni uuritavas aines resonantselt neeldunud footonite energia kohta, mida kasutatakse näiteks resonantses Auger'i spektroskoopias.

TOF on sobilik meetodika identifitseerimaks protsesse, mis viivad erinevate laengutega olekuteni. On olemas kaks põhimeetodit ioonide lennuaja mõõtmiseks. Tüüpilises PEPICO (*photoelectron-photoion coincidence*) fotoelektron-fotoioon samaaegsus eksperimentis detekteeritakse samast ionisatsiooniprotsessist pärit elektronid ja ioonid ühes mõõtettsükli, samas ajaaknas. Nii kasutatakse iooni lennuaja stardi impulsiks elektrondetektorilt saadud signaali. Kõiki elektrivälju, mis kiirendavad ioone, hoitakse konstantsetena. Modifitseeritud kujul kasutatakse elektrondetektorina elektronspektromeetrit, mis võimaldab fikseerida energiaakna, milliseiga sisenenud elektron käivitab ioonide mõõtmise. Seda meetodikat nimetatakse energiaanalüüsitud elektron-ioon samaaegsuse meetodiks (Energy Analyzed Photoelectron Photoion Coincidence, EAPEPICO).

Teine võimalus aja mõõtmisel startsignaali saamiseks on mõjutada ionisatsioonipiirkonda impulss elektriväljaga. Kui selle impulsi tõusev front saavutab teatud pingeniivo, alustatakse lennuaja mõõtmist. Seda meetodikat nimetatakse impulssmeetodikaks (Pulsed TOF). Kumba meetodikat kasutatakse sõltub, missugust informatsiooni soovitakse saada. Samaaegsuseeksperimentides on lugemiskiirused üldiselt palju madalamad. Teisalt on selle meetodiga võimalik saavutada paremaid ioonide masside lahutusi, kuna pole vaja müraid tekitavat ja elektrivälja moonutavat kõrgepingeimpulssi ionisatsioonipiirkonnale. Tüüpilised rakendatavad pinged impulssmoodis on tavaliselt mõnisada volti. Neid mõlemaid meetodeid saab kasutada osaioonide ristlõigete mõõtmiseks, kus erinevate laengute ja sestap ka erinevate lennuaegadega ioone mõõdetakse eraldi footoni energia funktsioonina.

Ioonide lennuaja meetodikatel on palju rakendusvõimalusi elektronspektroskoopias, kuna näiteks Auger kaskaadid ja shake up protsessid toodavad mitmekordselt ioniseeritud ioone. Nende analüüsimine ainult elektronspektritest on sageli väga keeruline nende madala intensiivsuse tõttu. Ka molekulide ergastamine võib viia fragmentatsioonini ning Auger protsessid võivad aset leida molekulis või mõnes tema fragmendis. Lisaks informatsioonile

erinevate fragmentide kohta võib sellistes protsessides vabanenud kineetilist energiat ennustada ionide lennuaja spektrist.

Lisaks lennuaja massspektroskoopiale kasutatakse ka kvadrupoolmassspektroskoopiat, aga seda põhiliselt testseadmetes ning selle spektromeetri tööpõhimõtet antud töös ei kajastata.

Vabade aatomite mõõtmisel on nõuded mass-spektromeetri lahutustele triviaalsed, sest lahutama peab ainult erinevate laengutega ioone. Molekulide puhul on nõudmised karmimad, sest fragmentide massid võivad erineda vaid ühe massiühiku võrra, eriti vesinikku sisaldavates molekulides (näiteks HCl, H₂S, HBr, HI, H₂O). [1]

Lennuaja massspektromeetrite põhiomadused

Ionide lennuaja võrrandid

Standartne Wiley-McLaren tüüpi topeltväljaga lennuaja mass-spektromeeter koosneb mitmest omavahel võrkudega eristatud elektrivälja piirkonnast. Kui gaasfaasis uuritavat ainet kiiritada ioniseeriva kiirgusega, sünnivad gaasi ja kiirguse interaktsioonipiirkonnas positiivsed ioonid ja negatiivsed elektronid. Nende eraldamiseks rakendatakse kahel pool ionisatsioonipiirkonda paiknevatele võrkudele kahepoolaarsed pinged, mis suunavad elektronid elektrondetectori (või elektronspektromeetri) suunas, ioonid aga ionide detectori suunas. Juhul kui TOF spektromeeter töötab impulssrežiimis, siis elektrone ei registreerita, vaid elektrondetectori poolsele võrgule rakendatakse kõrge positiivne pingepulss, mis "pühib" ioonid järgmisesse kiirenduspiirkonda. Kuna impulssidevahelisel ajal ionisatsioonipiirkonnale pingeid ei rakendata, on seal väljavaba ala ning kahe impulsi vahelisel ajal sündinud ioonid püsivad seal pingepulsi ilmumiseni. Seega saab ionide lennuaja mõõtmise startsignaali sellisel juhul kõrgepinge impulssgeneraatori tõusvast frondist, elektronide registreerimise korral aga elektrondetectorist. Pärast ionisatsioonipiirkonnast lahkumist satuvad ioonid kiirenduspiirkonda, kus nad kiirendatakse tavaliselt energiateni mitu kiloelektronvolti. Selle energiaga nad sisenevad ka väljavabasse triivtorusse (ingl. k. drift tube) ning liiguvad seal kuni ionide detectorini, mis on tavaliselt mikrokanalplaat (MCP). Enne detectorit kiirendatakse tavaliselt veel ioone, et vähendada MCP tundlikkuse erinevust eri raskusega ionidele. Kuna kõik ioonid asusid teele üheaegselt, jõuavad detectorini kiiremini kerged ja mitmekordselt ioniseeritud ioonid, kõige kauem võtab aega raskete ühekordselt ioniseeritud ionide teekond. Seega on ionide lennuaja järgi võimalik arvutada nende massi ja laengu suhet, mis ongi vajalik ionisatsiooni/fragmentatsiooniprotsesside uurimisel.

Matemaatiliselt võib kirja panna võrrandid, mis eelnevalt kirjeldatud protsessi seletavad. Näiteks erinevates regioonides asuvate ioonide lennuaja võrrandid on:

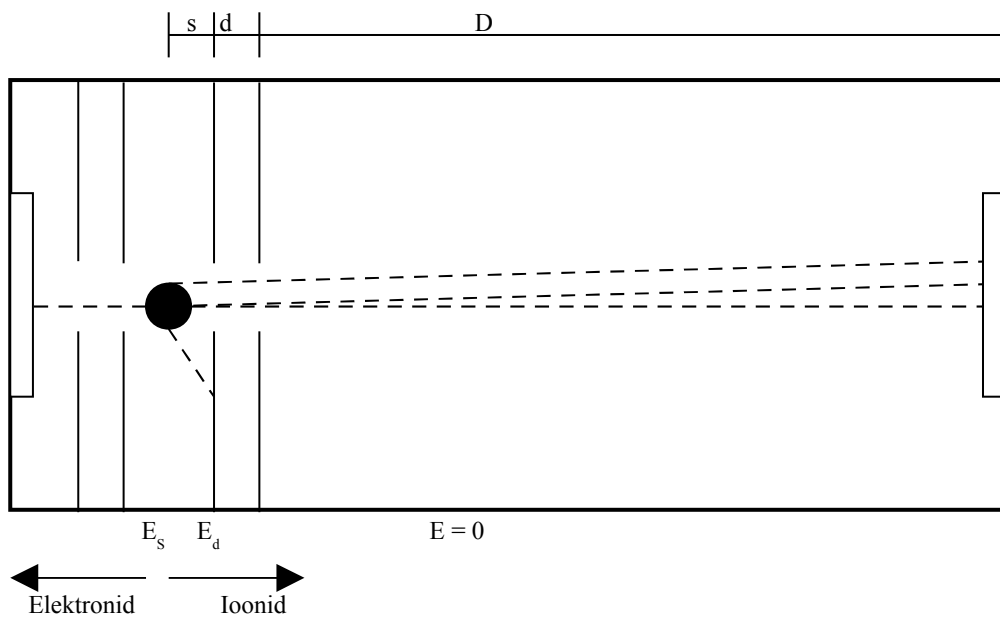
$$T_s = \frac{\sqrt{2m}}{qE_s} (\sqrt{U_0 \cos^2 \theta + qsE_s} - \sqrt{U_0 \cos \theta}), \quad (1)$$

$$T_d = \frac{\sqrt{2m}}{qE_d} (\sqrt{U} - \sqrt{U_0 + qsE_s}), \quad (2)$$

$$T_D = \sqrt{2m} \frac{D}{2\sqrt{U}}, \quad (3)$$

$$T = T_s + T_d + T_D, \quad (4)$$

kus U_0 on iooni algne kineetiline energia, s on iooni lennu teekonna alguspunkt mõõdetuna ionisatsioonipiirkonnast, d on kiirendusregiooni pikkus ja D on väljavaba triivtoru pikkus (vaata joonis 1). E_s ja E_d on elektriväljad ionisatsiooni- ja kiirenduspiirkondades ja θ nurk spektromeetri telje ja iooni liikumissuuna vahel. $U = U_0 + qsE_s + qdE_d$ on iooni kineetiline energia triivtorus ja T on kogu lennu aeg. Ioonid paiknevad umbes 85% kogu lennu ajast triivtorus. Ionisatsiooni- ja kiirenduspiirkondades paiknemise aeg on vastavalt 10% ja 5% tavaliste katsetingimuste puhul. [1]



Joonis 1. Ioonide lennuaja mass-spektromeetri joonis. Katkendjooned illustreerivad mõnesid võimalikke elektronide ja ioonide trajektoore spektromeetris.

Ruumfokuseerimise tingimus (space focusing condition)

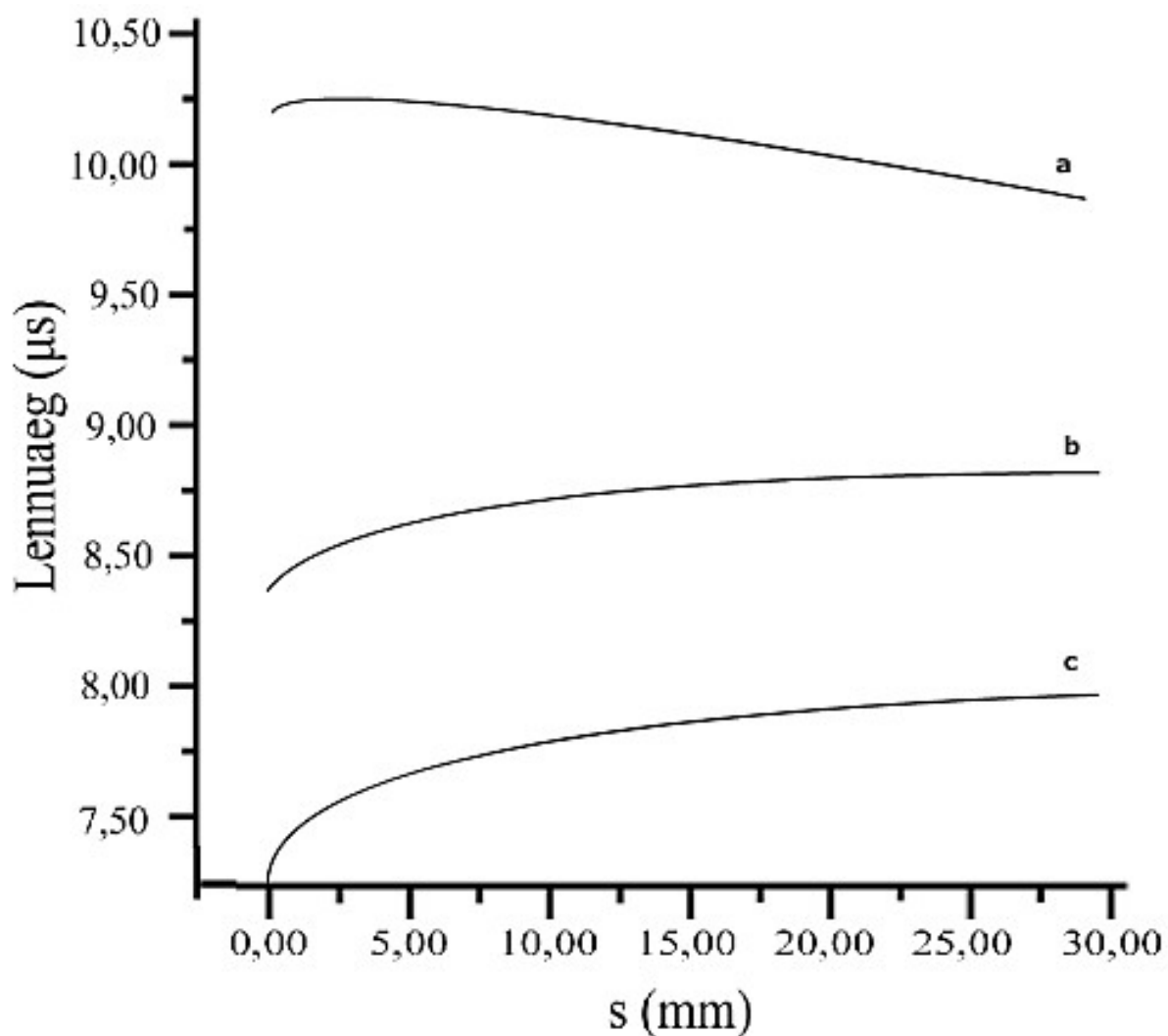
Lennuaja spektromeetri üldist lahutust mõjutab ionisatsioonipiirkonna suurus ja loodud ionide energiajaotused. Esimesest tingitud efekte saab minimiseerida nii-nimetatud ruum fokuseerimise tingimusega nii et ionisatsioonipiirkonna erinevates punktides moodustunud ning seetõttu pisut erinevate potentsiaalidega ionidel on ligikaudu sama lennuaeg. Selle tingimuse täitmiseks on vajalikud kaks eraldi piirkonda reguleeritavate pingetega, et ioone sobivalt kiirendada. Olgu s_0 ionisatsioonipiirkonna keskpunkt ja Δs ionisatsioonipiirkonna diameeter, mille määrab sissetuleva footonkiire suurus. Sellisel juhul ilmneb kahe iooni, mille kineetiline energia on null, ($U_0 = 0$) ning mis moodustuvad kaugustel $s_{max} = s_0 + 0,5\Delta s$ ja $s_{min} = s_0 - 0,5\Delta s$, maksimaalne lennutee erinevus. Potentsiaalide erinevuse tõttu saavutavad nad erinevad liikumiskiirused. Fokuseerimistingimuse rahuldamiseks otsime selliseid lennuaja parameetreid (s , d , D , E_s ja E_d) kombinatsioone, mis minimiseerivad lennuaja erinevused kahe moodustunud iooni vahel positsioonidel s_{max} , s_{min} ja kaotavad need sootuks, kui $\Delta s \rightarrow 0$, s.t. $\delta T/\delta s = 0$. Triivtoru optimaalse pikkuse parameetreid s , d , D , E_s ja E_d korral saame leida, seades $(dT/ds)_0, s_0 = 0$. Tulemuse saame võrrandist:

$$D = 2s_0 \sqrt[3]{k_0} \left(1 - \frac{1}{k_0 + \sqrt{k_0}} \frac{d}{s_0} \right), \quad (5)$$

kus

$$k_0 = \frac{s_0 E_s + d E_d}{s_0 E_s}. \quad (6)$$

Praktikas võime geomeetrilised dimensioonid s , d ja D fikseerida ning ruum fokuseerimise tingimuse leidmiseks tuleb lahendada lineaarne relatsioon E_s ja E_d vahel võrrandites (5) ja (6). Fokuseerimistingimuse illustatsioon on kujutatud joonisel 2 kus on kujutatud lennuaeg funktsioonina ionide stardipositsioonis ionisatsioonipiirkonnas kolme kiirenduspiirkonna väljatugevuse väärtusega.

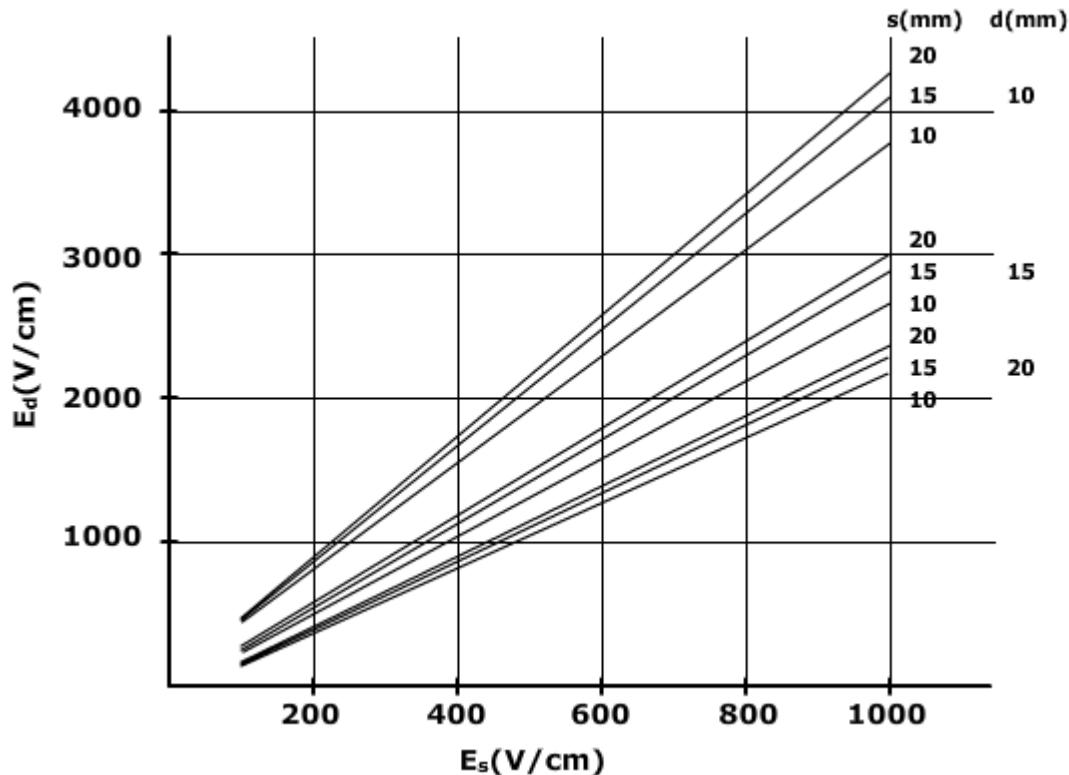


Joonis 2. Lennuajad iooni algpositsiooni funktsioonina ionisatsioonipiirkonnas erinevate kiirenduspingete ja konstantsete ekstraheerimispingete puhul. Ruum fokuseerimisel (keskmine joon – b) erinevatelt ionisatsioonipiirkonna positsioonidelt algavate ionide lennuajad on samad. [1]

Lennuajad on saadud võrranditest (1)-(4), eeldades, et $U_0 = 0$ ja $\theta = 0$. Ionisatsioonipiirkonna tugevus oli võetud konstantseks 500 V/cm. Kiirenduspiirkonna ja triivtoru pikkused olid võetud vastavalt 30mm ja 440mm. Joonise 2 põhjal on ilmne, et iooni lennuaeg on sõltumatu oma algpositsioonist ionisatsioonipiirkonnas kui fokuseerimistingimus on rahuldatud (keskmine joon graafikul). Joonisel 3 on teise näitena välja arvatud elektriväljad rahuldamiseks fokuseerimistingimust lennuajaspektromeetri jaoks. Triivtoru pikkuseks on võetud 210mm. Üksikult ja topelt laetud Ar, Kr ja Xe ionide lennuaja ja joonelaiuste arvutustulemused vastavalt antud tungimustele on kirjas Tabelis 1. [1]

	Ar^+		Ar^{2+}		Kr^+		Kr^{2+}		Xe^+		Xe^{2+}	
	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$	T(μs)	$\Delta T(\text{ns})$
	A:											
a	5,55		3,92		8,03		5,68		10,0		7,11	
b	5,56		3,93		8,06		5,7		10,0		7,13	
c	5,58	26	3,94	13	8,08	37	2,71	19	10,1	47	7,15	23
d	5,33		3,77		7,73		5,46		9,67		6,84	
e	5,13		3,62		7,42		5,25		9,29		6,57	
f	5,41		3,82		7,84		5,54		9,81		6,93	
	B:											
a	2,48		1,75		3,59		2,54		4,5		3,18	
b	2,22		1,57		3,22		2,28		4,03		2,85	
c	2,07		1,46		2,99		2,12		3,75		2,65	
d	2,45		1,76		3,55		2,51		4,45		3,14	
e	2,26	5	1,6	3	3,27	8	2,32	4	4,09	9	2,89	5
f	2,13		1,51		3,09		2,18		3,87		2,73	

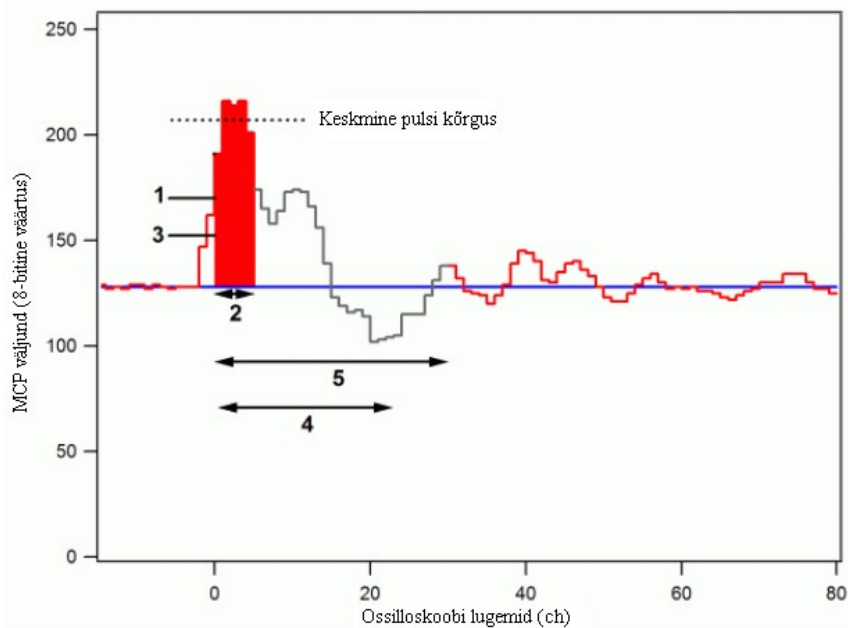
Tabel 1. Lennuajad ja spektrilaiused elementidele Ar (37 amü), Kr (84 amü) ja Xe (129 amü) on arvatud võrranditest (1)-(4) ja (8). Triivtoru pikkus on 210mm ja elektrivälja tugevused on 100V/cm (A) ning 500 V/cm (B). Ionisatsiooni- ja kiirenduspiirkondade pikkused on $s = d = 10$ mm (a); $s = 10$ mm, $d = 15$ mm (b); $s = 10$ mm, $d = 20$ mm (c); $s = 20$ mm, $d = 10$ mm (d); $s = 20$ mm, $d = 15$ mm (e); $s = 20$ mm, $d = 20$ mm (f). Ioonide kineetiline energia on 20 meV. Selguse mõttes on igas spektri laiuse tulbas kirjas ainult ühte väärtust. [1]



Joonis 3. *Vajalikud elektriväljad rahuldamiseks ruumfokuseerimise tingimust lennuajaspektromeetris. [1]*

TOF süsteemi elektroonika tööpõhimõte

Ioonid registreeritakse mikroanalplaat detektoriga. Üldjuhul kasutatakse kahte MCP plaati, mis on omavahel ühendatud nn. “chevron” tüüpi ühendusena. MCP pingestatakse pingejagajate abil ning üldjuhul ei tohi ühele plaadile rakendatav pinge ületada ühte kilovolti. Juhul kui kasutatakse paigatundlikku anoodi, võetakse kiire ajasignaal MCP teise plaadi väljundist, kui ei kasutata, siis anoodilt. Pärast eelvõimendit läheb MCP-lt saadud impulss digitaliseeriasse. Kuna MCP impulsi kuju ei ole kunagi ideaalne, vaid koosneb mitmest komponendist ning sisaldab tavaliselt ka peegeldusi (tegu on nanosekundiliste impulssidega), ei ole ajainformatsiooni saamine sealt triviaalne. Järgneval joonisel on toodud MCP-lt saadud keskmistatud impulsi kuju.



Joonis 4. Mikrokanalplaadilt saadud keskmistatud impulsi parameetrid. [2]

Järgnevalt on toodud mõningad parameetrid, mille järgi mõõteprogramm impulssi detekteerib. 1 – diskrimineerimislävend. Programm hakkab võimalikku piiki identifitseerima kui ühe kanali kõrgus ületab antud lävendi väärtuse. 200meV sisendpiirkonna puhul on tüüpiline väärtus 140-150.

2 – piigi laius. Kui diskrimineerimislävend on ületatud, arvutatakse järgmise n kanali (n – piigi kõrgus) keskmine kõrgus ja võrreldakse seda „Counting level“ (loendamislävend) parameetriga. Piiki arvestatakse õige MCP pulsina, kui saadud keskmine on kõrgem kui loendamislävend. MCP peamine piik on umbes 10 ns lai, seega on sobiv piigilaius ligikaudu 5 ns. Piigilaius (ns) on võrdne piigi laius (ch) korrutatud ajasamm (ns).

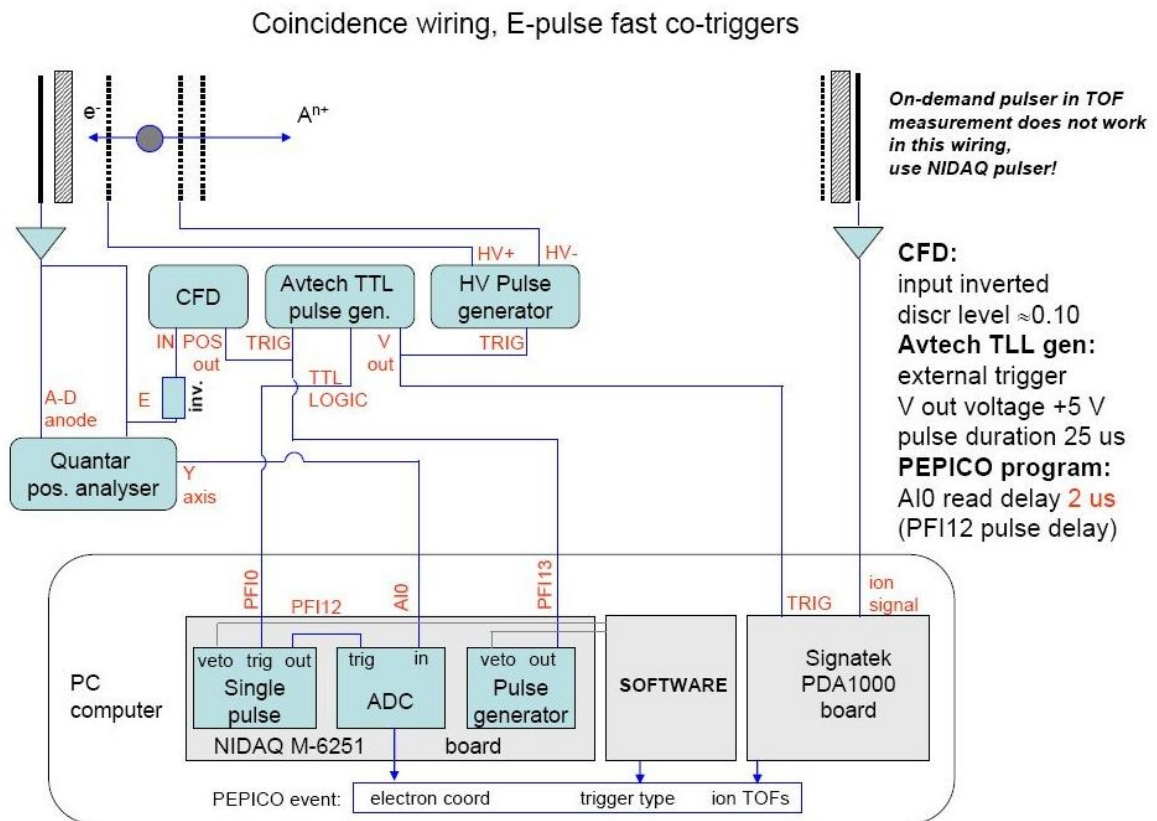
3 – loendamislävend. Minimaalne lubatud keskmine piigi kõrgus.

4 – maksimaalne piigi laius. Eemaldab piigid, mis pidevalt ületavad diskrimineerimislävendi üle suurema vahemiku, kui maksimaalne piigilaius. Parameetrid piigilaius ja maksimaalne piigilaius peaksid üheskoos välja filtreerima liiga teravad ja liiga laiad piigid, mis vastavad kõrge ja madala sagedusega mürale.

5 – piigi vari. Põhiolemuselt surnud aeg pärast pulssi. See takistab sama pulsi lugemist kaks korda. See peaks olema piisavalt pikk, et ostsilloskoobi signaal jõuaks tagasi allapoole diskrimineerimislävendit pöörduda. [2]

Praeguses kasutuses oleva TOFi lennuajamõõtmiste elektroonikasüsteem koosneb kõrgepinge impulssgeneraatorist, välisest impulssgeneraatorist, Quantar võimendist (võimendab

elektronspektromeetri kohatundlikust anoodist saabunud elektronsignaali), NI DAQ M-6251 PC kaartist (on arvuti poolt juhitud impulssgeneraator) ja Signatec-i PDA1000 digitaliseerijast. Joonis 4 annab ülevaate sellest süsteemist plokkskeemi näol.



Joonis 4: Sellel joonisel on kujutatud lennuajamõõtmise süsteemi blokkskeem ja põhielemendid.

Üldine süsteem on sarnane PEPICO ja impulss TOF eksperimentide puhul. Erinevus seisneb selles, et PEPICO eksperimendi puhul tuleb startsignaal elektronspektromeetri detektorilt, TOF puhul välisgeneraatorilt.

Süsteemis kasutatava tarkvara abil määratakse mõõtmistulemusena saadud signaali parameetrid.

Digitaliseerijad ja aeg-digitaalmuundajad

Digitaliseerijad ja aeg-digitaalmuundajad võimaldavad analoogsignaali lugemist ja edasise töötlemise tarvis digitaalseks muutmist. Digitaliseerija muudab analoogsignaali vastavalt oma vertikaalsele lahutusele digitaalseks kujutiseks. Aeg-digitaalmuundaja teisendab

sporaadilistest impulssidest koosneva signaali digitaalseks indekseeritud kujutiseks, ehk annab väljundina iga sissetulnud impulsi aja.

Erinevad tootjad pakuvad kõnealuseid seadmeid vastavuses erinevate standarditega, näiteks VME (*Versus Modula Eurocard* või *Virtual Machine Environment* – virtuaalmasinakeskkond), NIM (*Nuclear Instrumentation Module* – tuumainstrumenteerimismoodul) ja PCI (*Peripheral Component Interconnect* – välisseadmeühendus). Lisaks standarditele erinevad seadmed ka muude võimaluste ja parameetrite, näiteks töötamissagedus, sisendkanalite arv, lugemi ulatus ja muude parameetrite poolest.

Internetiuuringu põhjal leidsin mitmete erinevate tootjate (Caen, Gage, Signatec, Highland Technologies, Agilent Technologies, Acam) poolt pakutavaid signaali digitaliseerijaid ja aeg-digitaalmuundajaid. Järgneb ülevaade mõnedest kiireimatest leitud seadmetest, mida võiks kasutada lennuaja mõõtmiste teostamisel.

GaGe digitaliseerijad

Firma GaGe pakub muude toodete hulgas ka 8, 12, 14 ja 16-bitise lugemisulatusega seadmeid PCI siinile ja ka USB kaudu arvutiga suhtlevaid kompaktsed digitaliseerimisseadmeid. Kiireimad nimetatutest on CobraMax™ CompuScope ja USB CompuScope perekonna tooted. [3]

8. aprillil, aastal 2009 kuulutas GaGe, ülemaailmne liider kõrgtaseme PC baasil digitaliseerijate ja ostsiloskoop-kaartide tootmises, CobraMax™ perekonna kiirete 8-bitise lahutusega digitaliseerijate turulepaiskamisest.

CobraMax pere digitaliseerijaid on saadaval ühe või kahe digitaliseerimiskanaliga, 3 või 4 giga-sämplit sekundis lugemiskiirusega ja kuni 1,5 GHz ribalaiusega. Kaardil oleva kuni 4 miljardi lugemi suuruse mäluuga pakuvad CobraMax digitaliseerijad ideaalset kombinatsiooni suure kiirusega andmekogumisest ja märkimisväärsest kaardi oma-mälust.

Kasutades ära GaGe Expert™ FPGA (i.k *field-programmable gate array* – kasutaja poolt seadistatav loogikaväravate tabel) seadmepõhist signaalitöötlustehnoloogiat, näiteks signaali keskmistamist, on kasutajatel võimalik teostada andmete analüüsi juba digitaliseeriija enda vahenditega, et vähendada edasiseks analüüsimiseks PC-sse transporditavat andmehulka.

Rakenduste tarvis, mis vajavad mitut samaaegset digitaliseerimiskanalit, on võimalik kokku ühendada kuni 8 CobraMax digitaliseerijat ühe šassii külge ja saavutada mitme kaardi sünkroniseeritus. See on võimalik tänu GaGe-i arenenud sisemise taktisignaali distributsiooni tehnoloogiale. Kasutades lühikesi ja kontrollitud ajastussignaali levimisradu ja automaatset

ajastuse kalibreerimist, tagab see tehnoloogia minimaalse kaartidevahelise ajanihke ja virvenduse tekkimise võrreldes teiste välise multi-moodul sünkroniseerimistehnikatega.

Lihtsaks integreerimiseks on CobraMax digitaliseerijad varustatud ka referents taktsignaali sisendi ja väljundiga, ning välise triger signaali sisendi ja väljundiga.

GaGe-i Cobra perekonna digitaliseerijad on ühilduvad GageScope® ossilloskoobi tarkvaraga, mis lubab kasutajal signaale hankida ja analüüsida ilma mingi lisaprogrammeerimiseta. Kasutajatele, kes soovivad ise endale originaalseid tarkvararakendusi luua, pakub GaGe ka võimsaid tarkvaraarenduskomplekte C/C#, MATLAB® või LabVIEW® ja teiste populaarsete programmeerimiskeskondade jaoks. [4]

CobraMax CompuScope Family



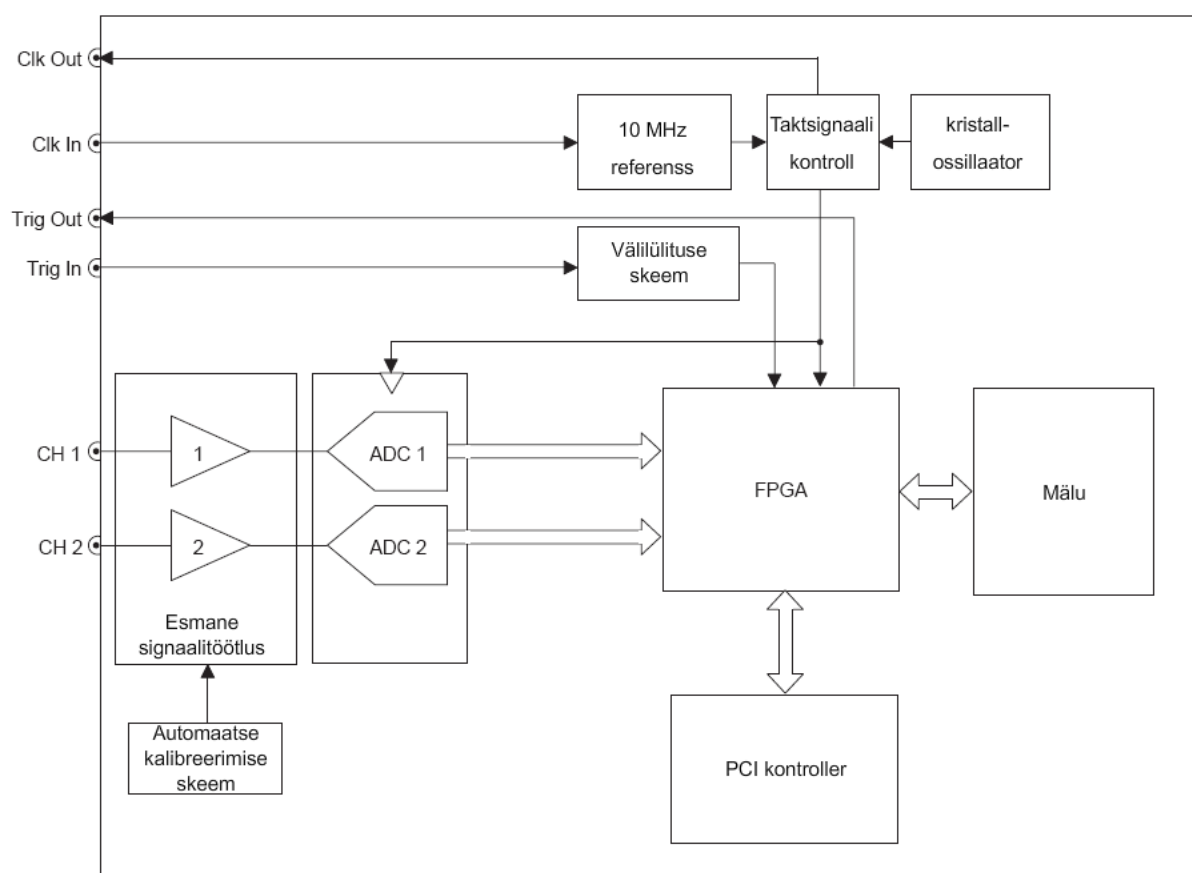
Pildil olev PCI kaart (CS14G8) on praegu kõige kiirem GaGe firma poolt pakutav digitaliseerija.

Omadused:

- 1 või 2 kanalit
- 3 või 4 GS/s maksimaalne lugemissagedus kanali kohta
- 8 bitine vertikaalne lahutus
- 256 MS kuni 4 GS kaardi enda mälu
- 1,5 GHz ribalaius
- ühe PCI pesa jaoks mõeldud täissuurusega kaart
- tarkvara abil sätitav signaalitöötlus
- 32-bitine, 66 MHz PCI standard andmeedastuskiirus 200 MB/s arvuti mälu
- lihtne integreerida taktsignaali sisendit ja väljundit, välist trigeri sisendit ja väljundit
- programmeerimisvaba opereerimine GageScope® ossilloskoobi tarkvaraga
- tarkvara-arenduskomplektid LabVIEW, MATLAB, C/C# jt. Jaoks

Mudel	Kanalite arv	Muundamissagedus (GS/s)	Maksimaalne kahe kanaliga muundamissagedus (GS/s)	Tellimiskood
CS14G8	1	4	-	CBX-014-000
CS23G8	2	3	1,5	CBX-023-000
CS13G8	1	3	-	CBX-013-000

Tabel 2: CobraMax perekond koosneb kolmest tootest.



Joonis 6: CobraMax lihtsustatud blokkdiagramm. Clk out – taktsignaali väljund, Clk in – taktsignaali sisend, Trig out – trigeri väljund, Trig in – trigeri sisend, CH – kanal. [5]

Signatec digitaliseerijad

Signatec on alates aastast 1988 disaininud ja tootnud lauarvutitele suunatud kõrgel kiirusel töötavaid seadmeid valdkondades: andmehõive ja signaali digitaliseerimine, paralleelne digitaalne signaalitöötlus, signaali genereerimine ja esitus, reaaliajaliste signaalide

salvestamine. Hetkel selle firma poolt toodetud PCI siiniga ühilduvatest digitaliseerijatest kõige kõrgemate parameetritega seade on PX1500-4. [6]

17. detsembril aastal 2009 kuulutas Signatec oma uusima ja arenenuma kõrge kiirusega PCIe siiniga ühilduva lairiba digitaliseerija, PX1500-4, turustamisest. PX1500-4 püüab signaale neljalt sünkroniseeritud kanalilt muundamissagedusega kuni 1,5 GHz või kahe sünkroniseeritud kanali puhul kuni 3GHz, kui kasutada analoog-digitaalmuundurite vaheldumist (i.k *interleaving*). Üheks suureks FIFO-ks konfigureeritud 2 GB kaardi omamälu ja PCIe x8 siin võimaldab jätkuvat pikka salvestust kiirusel kuni 1,4 GB/s läbi PCIe x8 siini (nii mehaaniliselt kui elektriliselt) PC kettale ilma mingi katkestuseta analoogsignaali lugemisel.

Kahekordne Virtex®-5 FPGA manussüsteem kontrollib PX1500-4 kaardi funktsioneerimist digitaalse signaalitöötuse (i.k *digital signal processor* - DSP) loogikaplokkide abil, mis on kummaski kiibis olemas ja võimaldavad kohandatavat liinisisest signaalitöötlust. Xilinx-i koostööprogrammi partnerina valmistas Signatec standardiseeritud andme- ja kontrollliidesed. Need on tellijale kättesaadavad koos VHDL lähtekoodi näidetega, mis demonstreerivad nende kasutajaliideste kasutamist, et valikuliste püsivara arenduskomplektide abil lihtsustada reaalaajalist töötlust.

Lisaks kõrgele töökiirusele ja mitme kanali jõudluse võimalustele võimaldab PX1500-4 paindlikku lugemissageduse valikut alates 200 MHz kuni 1500 MHz. See paindlikkus ei olene sellest, kas kasutada seesmist või välist taktsignaali.

Selline kella takti täpne sättimine ilma, et lugemi kvaliteet kannataks, annab parima integreeritud kaardipõhise analoog-digitaalmuundaja taktsignaali paindlikkuse tööstuses. Kasutaja ei pea enam piirduma fikseeritud või kahega jagatava taktsignaaliga. See omadus on ideaalne rakendustes, kus Nyquist-i reeglit (diskreetimissagedus peab Nyquist'i reegli kohaselt olema vähemalt 2 korda suurem, kui kõige kõrgem analoogsignaali sageduskomponent) tuleb eriti täpselt rakendada, et optimeerida vastuvõetavate andmete ribalaiust. Lisaks kaardi enda taktsignaali võimalustele saab analoog-digitaalmuundurile ka välisest allikast taktsignaali sөөта.

Kasutades Master/Slave konfiguratsiooni, saab kaardi ülemisse osasse ühendatava ribakaabli abil omavahel ühendada kuni neli PX1500-4 kaarti. Sellise seadistuse puhul jagab ülemõigustega (master) taktsignaali alamõigustega (slave) kaartidele, et andmete lugemine toimuks igal kaardil samaaegselt. Kasutades kellatakti ja triger signaali allikana SYNC1500-6 kaarti, on võimalik sünkroniseeritud opereerimiseks kokku ühendada kuni 6 PX1500-4 kaarti, mis on erinevate arvutiraamide küljes. [7]

PX1500-4



Omadused:

- 4 analoog-kanalit 1500 MHz lugemissagedusega 8-bitise vertikaalse lahutusega kanali kohta
- 2 analoog-kanalit 3000 MHz lugemissagedusega 8-bitise vertikaalse lahutusega kanali kohta vahelduvlugemise (i.k *interleaved mode*) korral
- ribalaius kuni 2 GHz
- 2 Gigabaiti mälu
- üle 1400 MB/s pidev andmeedastus PCI Express siini kaudu (8 traadiga)
- Xilinx Virtex-5 FPGA
- võimalik 2000 MB/s andmeedastus üle Signatec abisiini (i.k *Signatec Auxiliary Bus*)
- kasutaja rakendustugi: programmeeritav FPGA, rikkalik tugi kasutaja riist- ja tarkvara kohaldatud töötlusfunktsionaalsusele, Xilinx-ga ühilduv JTAG port lihtsustab kasutaja FPGA töötluse arendust. [8]

PDA1000



Võrdluseks toome ka praeguses TOF elektroonikasüsteemis kasutatava PDA1000 põhiaandmed.

Omadused:

- 1 kanal, kuni 1 GHz lugemissagedus
- ribalaius 500 MHz
- mälu 256 Megabytes MB

- 500 MB/s andmeedastuskiirus Signatec abisiini kaudu (SAB - Signatec Auxiliary Bus)
- 266 MB/s andmeedastuskiirus üle PCI siini
- 8-bitine lahutus
- 64/32 bitine isehäälestuv (i.k *Plug and Play*) PCI kaart [9]

Caen digitaliseerijad

Caen-i signaali digitaliseerijad on suurel kiirusel töötavad (kuni 5 GS/s – giga-lugemit sekundis) platvormist sõltumatud, mitme analoog-digitaalmuundamise kanaliga, lokaalse mäluga, FPGA-ga (Field-Programmable Gate Array - kasutaja poolt seadistatav loogikavärvate tabel) reaaliajalise andmetöötusega instrumendid. Neid on saadaval erineva füüsilise standardiga:

- VME (liidesed VME64X, optiline ühendus)
- NIM (liidesed USB 2.0, optiline ühendus)
- Töölaua (i.k *desktop*) seade (liidesed USB 2.0, optiline ühendus)
- PCI Express

Sisendi tüüp võib olla maandatud (i.k *single ended*) või diferentsiaalne (i.k *differential*). Maandatud versiooni puhul võib sisendi alalisvoolu nihet reguleerida programmeeritava 16-bitise digitaal-analoog muunduriga.

Digitaliseerijad töötavad sisemise või välise taktsignaaliga. Mõlemal juhul genereeritakse lugemistakt programmeeritava PLL (*phase-locked loop* – faas-lukustus tsükkel) abil.

VME versioonidel on taktsignaali väljund, mis võimaldab jadamisi takti saatmist.

Igal kanalil on programmeeritava suurusega puhvritesse (1÷1024) jaotatud SRAM mälu (alatest 192 kS kuni 10 MS kanali kohta) iseseisva lugemise/kirjutamise õigusega. Andmevoogu kirjutatakse pidevalt ringjasse mälupuhvrisesse. Kui trigerdamine toimub, kirjutab FPGA edasised N lugemit ja külmutab lugemiseks kasutatava puhvri. Andmehõive võib jätkuda ilma katkestuseta uues puhvris.

Triger signaali saab anda esipaneeli ja ka tarkvara kaudu, kuid on ka võimalik genereerida sisendsignaali põhjal omatrigerdamine (i.k - *self-trigger*). VME versiooni puhul saab triger signaali ühe kaardi pealt teisele saata esipaneeli trigeri väljundi kaudu. Moodulitel on digitaalse impulsitöötuse (i.k *Digital Pulse Processing* - DPP) püsivara füüsika rakendustele. See omadus võimaldab kasutajatel sooritada kaasajalist töötlust vahetult digitaliseeritud detektori signaaliga:

- nutika trigeri (i.k *Smart trigger*) genereerimine impulssidele, mis leevendavad müra, põhilugemi (baseline) fluktuatsiooni ja kokkukuhjumist.
- sooritada „null-piirangu“ (i.k *zero suppression*) ja „andmete vähendamise“ (i.k *data reduction*), lühendades lugemisaega ja hüljates lugemid, mis on programmeeritavast lävest väiksemad.
- ekstraheerida huvi pakkuvaid suuruseid (impulsi ajastus, impulsi energia jne.) vähendades sündmuse andmehulga kogust.
- Soovi korral on saada spetsiaalsed algoritmid.

VME versioonil on 16 üldiseks kasutuseks mõeldud LVDS (i.k *Low-voltage differential signaling* – madala pingega diferentsiaalsignaliseerimine) sisendit/väljundit ja analoogväljund mis võimaldab sisendsignaali summat ja suuremat osa puhvri valdamisest reprodutseerida.

Optiline link võimaldab jadaühendust (i.k *daisy chain*) ja andmevahetuskiirust 80MB/s. Seega on võimalik ühendada kuni 32 analoog-digitaalmuundurmodulit (kuni 2048 A-D muundamiskanalit) ühe optilise lingi kontrolleri külge (mudel A2818/A3818). [10]

NIM - N6751



Omadused:

- 2/4 kanalit
- 10-bitine vertikaalne lahutus 2 GS/s lugemissagedus (vahelduvlugemine) - 1 GS/s A-D muundur
- 1 Vpp sisend-dünaamika (maandatud)
- 16-bitine programmeeritav alalisvoolu nihke häälestamine ($\pm 0.5V$)
- MCX (mikro koaksiaal) sisend (50Ω , maandatud)
- Trigerite ajatemplid
- Mälupuhver kuni 1,835MS/s

- FPGA reaajas andmetetöötlemiseks
- Null piirangu ja andmete vähendamise algoritmid
- Programmeeritavad sündmuste suurused ja eel-järel trigerite häälestamine
- Optilise ühenduse liides (CAEN eraprotokoll)
- USB 2.0 ühilduv liides
- USB/optilise liidese kaudu uuendatav püsivara
- Teegid (C ja LabView) ja tarkvara tööriistad Windowsile ja Linuxile
- Seade vastab NIM standardile [11]

VME - VX1751



Omadused:

- 4/8 kanalit
- 10-bitine vertikaalne lahutus 2 GS/s lugemissagedus (vahelduvlugemine) - 1 GS/s A-D muundur
- 1 Vpp sisend-dünaamika (maandatud või diferentsiaalne)
- 16-bitine programmeeritav LVDS sisend/väljund
- MCX (mikro koaksiaal) sisend (50 Ω , maandatud)
- Trigerite ajatemplid
- Mälupuhver kuni 4 MS/kanal
- FPGA reaajas andmete töötlemiseks
- Null piirangu ja andmete vähendamise algoritmid
- Programmeeritavad sündmuste suurused ja eel-järel-trigerite häälestamine
- Optilise ühenduse liides
- A2818 PCI kontrolleri, mis on korrara võimeline 8 optilise ühendusega moodulit käsitsema

- USB/optilise liidese kaudu uuendatav püsivara
- Teegid (C ja LabView) ja tarkvara tööriistad Windowsile ja Linuxile
- VME64X vastav liides
- Väline analoog digitaalmuunduri takti sisend
- Esipaneeli taktsignaali sisend/väljund mitme seadme sünkroniseerimiseks
- VME/optilise liidese kaudu uuendatav püsivara
- Demo tarkvara [12]

VME - V1751



Omadused:

- Mälupuhver kuni 1,835 MS/kanal
- Muus osas analoogiline mudeliga VME - VX1751 [13]

VME - V1742



See mudel ei ole veel lõplikult valmis. Caen lubab selle peatselt müüki lasta.

Proгноositud omadused:

- 32+2 kanalit
- 12 bitine vertikaalne lahutus, 5 GS/s lugemissagedus

- 1 Vpp dünaamiline sisend, maandatud, $50\ \Omega$, MCX koaksiaal pistik
- baseerub DRS4 kiibil (Paul Scherrer Instituudi disain)
- 1024 sümpli suurune mälu kanali kohta (200 ns salvestusaeg sündmuse kohta @ 5GS/s)
- Trigeri ajatemplid
- Mälupuhver: 128 sündmust kanali kohta (valikuline: 1024 sündmust kanali kohta)
- ~100 μ s konversiooni aeg
- võimalik FPGA reaalaajaliseks andmetötluseks (näiteks null piirangu ja andmete vähendamise algoritmid)
- VME64X-ühilduv ja optilise lingi liidesed
- PCI kontrolleri 8 jadamisi ühendatud mooduli käsitsemiseks optilise lingi kaudu
- Püsivara uuendamise võimalus VME/optilise lingi kaudu
- teegid, demod (C ja LabView) ja tarkvara tööriistad Windowsile ja Linuxile [14]

DT5761



See töölauda tüüpi (i.k *desktop*) mudel ei ole veel lõplikult valmis. Caen lubab selle peatselt müüki lasta.

Proгноositud omadused:

- 1 kanal
- 10-bitine vertikaalne lahutus, 4 GS/s lugemissagedus (vahelduv)
- 1 Vpp dünaamiline sisend (maandatud)
- 16-bitine programmeeritav alalisvoolu nihke häälestamine ($\pm 0.5V$)
- MCX (mikro koaksiaal) sisend ($50\ \Omega$, maandatud)
- Trigerite ajatemplid
- Mälupuhver kuni 7.2MS/s
- FPGA reaalaajaliseks andmetötluseks

- null piirangu ja andmete vähendamise algoritmid
- Programmeeritavad sündmuste suurused ja eel-järel-triggerite häälestamine
- Optilise ühenduse liides (CAEN eraprotokoll)
- USB 2.0 ühilduv liides
- Püsivara uuendamine USB/optilise liidese kaudu
- teegid, demod (C ja LabView) ja tarkvara tööriistad Windowsile ja Linuxile
- Väline vahelduv-alalisvoolu toiteallikas (+12V)
- mõõtmed: 154x50x164 mm³ (laius*kõrgus*pikkus) [15]

Highland Technology aeg-digitaalmuundajad

Highland Technology disainib ja toodab standartseid ja kohandatud täpsusega töötavaid elektroonikainstrumente. California korporatsioon asutati aastal 1984 aastal, Highland pakub innovatiivseid, arenenud seadmeid aitamaks oma klientidel jõuda seatud sihtmärkideni. Firma ekspertiisi kuulub analoogmõõtmine ja signaali genereerimine, impulsi pikosekundi täpsusega ajastus, fotoonika ja kompleksne atmosfääri ning teaduslikke protseduure puudutav segatud tehnoloogiate instrumentatsioon. [16]

Selle firma poolt pakutav suurima töötamissagedusega aeg-digitaalmuundaja on mudel V660.

V660



V660 on 12 kanaliga aeg-digitaalmuundaja. Seda kasutatakse 12 iseseisva impulss-sisendi ajaliste sündmuste salvestamiseks. Igal kanalil on teistest sõltumatud ajatemplid, mida puhverdatakse FIFO mälus.

V660 võib kasutada jooksvaks sündmuste indekseerimiseks või ühekordseteks mõõtmisteks. Iga kanal salvestab sündmusi, mille intervall on vähemalt 150 ns.

Omadused:

- 12 kanalit, 32-bitine ajatempel
- Mõõdab kuni 6,71 sekundi pikkuseid ajaintervalle
- Iga kanal on iseseisev aja indekseerija
- 256 lugemi suurune FIFO mälu iga kanali jaoks.
- Virvendus tavaliselt vähem kui 75 ps ruutkeskmisest (i.k RMS - *root mean square*)
- Võimalus kasutada 8 MB RAM-i sündmuste puhverdamiseks
- 32-bitine VME moodul
- saadaval elektriliste või optiliste sisenditega. [17]

Agilent Technology aeg-digitaalmuundajad

Mõõtmisfirmade esirinnas teeb Agilent lähedast koostööd inseneride, teadlaste ja uurijatega üle kogu maakera, et otsida lahendusi üha uutele väljakutsetele elektroonika, elu-teaduste (i.k *life sciences*) ja keemia valdkondades. Firma kaks põhilist ärivaldkonda on elektroonilised ja bio-analüütilised mõõtmised, mida toetab Agilent teaduslaboratooriumi (Agilent Research Laboratories) keskne uurimisgrupp. [18]

Kiireim Agilent-i aeg-digitaalmuundaja on Agilent U1050A.

Agilent U1050A



Omadused:

- 12 kanalit, kaks andmekogumismoodust: ühekordne start ja multistart (i.k *single start* ja *multistart*)
- 5 või 50 ps ajaline lahusus
- ideaalne suuremastaabiliste eksperimentide mõõtmiseks, näiteks osakeste kiirendusaja, tuumafusiooni ja plahvatuste testimiseks
- pikk mõõtmisaeg, kuni 20 sekundit esimese ja viimase sündmuse vahel

- seesmine mälu puhver kuni 512 sündmuse salvestamiseks
- madal virvendus (< 3 ps RMS), kõrge stabiilsus (± 2 PPM – *Pulse Position Modulation* – impulss-positsioon-modulatsioon), sisemine taktsignaali allikas
- Väline 10MHz etalonsisend
- FPGA baasil andmetöötlus
- Kiire DMA väljalugemine ja suurendatud andmete läbilase
- Ülepinge kaitsmetega sisendid $50\ \Omega$ K-luku pistikuga
- Sisseehitatud iseeneslik kalibreerimine
- Võrdlemisi madal energiatarve (< 25 W) [19]

Acam aeg-digitaalmuundajad

Acam on spetsialiseerunud kõrge lahutusega aeg-digitaalmuundajatele. Acam toodab arenenud aeg-digitaalmuundajaid ja mõõtmisüsteeme lennuaja, laseri rakenduste, mahtuvuse, kiiruse sensorite tarvis. Oma odavama tootmishinna ja kiirema disainitsükli tõttu vahetavad aeg-digitaalmuundajad välja traditsioonilised analoog-digitaalmuundajad. [20]

TDC-GPX



TDC-GPX on aeg-digitaalmuundaja ühe kiibi näol. See on ideaalne vahend meditsiiniliste ja füüsika rakenduste lennuaja mõõtmiseks. Kõige võimsama isendina Acam peres, GPX-i multifunktsionaalne arhitektuur disainiti kõrge ühekordse (i.k *single shot*) lahutuse, parima impulsi paari lahutuse ja kõrgete mõõtmisageduste tarvis. TDC-GPX realiseerib suure hüppe edasi lennuegade mõõtmises digitaalmuundajate valdkonnas.

Nelja erineva opereerimisvõimalusega 8-kanaline 32-kordne mitmetabamuse võimaluse ja kuni 10 ps lahutusega TDC-GPX on sobiv vahend lennuegade, tööstuse, füüsika ja meditsiinialaste rakenduste kõrge jõudluse ja täpsusega mõõtmiste sooritamiseks. [21]

Kokkuvõte

Antud TOF elektroonikasüsteemi on võimalik täiustada võimsama digitaliseerija ja/või aeg-digitaalmuundaja kasutuselevõtmisega. Mugavuse ja lihtsuse mõttes sobiks praeguse PDA1000-ga analoogiline PCI siinile ühenduv digitaliseerija. Võimsaimad saadaolevad taolised digitaliseerijad on GaGe CobraMax perekonda kuuluv mudel CS14G8 ja Signatec-i enda toodetud PX1500-4. Esimene neist on pisut kiirema maksimaalse töötamissagedusega (kuni 4GHz) ja kaardi omamäluga (4 GB), kuid pisut väiksema ribalaiusega (1,5 GHz). Vertikaalne lahusus on mõlemal kaardil võrdne ja sama mis PDA1000 digitaliseerijal. Muude omaduste poolest on need kaks uut seadet tunduvalt võimsamad vanemast PDA1000-st. Seega lennuaja eksperimentidest täpsemate mõõtmistulemuste saamiseks oleks mõislik praeguses süsteemis andmeid digitaliseeriv PDA1000 välja vahetada nendest kahest ühe võimsama seadme vastu. Ülevaatliku võrdluse nendest kolmest digitaliseerijast annab tabel 3.

	GaGe CobraMax	Signatec PX1500-4	Signatec PDA1000
Muundamissagedus (GHz)	3 või 4	1,5 või 3	1
Kanalite arv	1 või 2	2 või 4	1
Resolutsioon (bit)	8	8	8
Mälu (GB)	4	2	0,256
Ribalaius (GHz)	1,5	2	0,5

Tabel 3: Võrdlustabel kahe uuema digitaliseerija (CobraMax ja PX1500-4) ning praeguses TOF – lennuajasüsteemis kasutatava PDA1000 digitaliseerija põhiomaduste kohta.

Teistsuguste standarditega, näiteks VME või NIM digitaliseerijate ja aeg-digitaalmuundajate kasutamine eeldaks muudatusi TOF elektroonikasüsteemi korralduses, kuid põhimõtteliselt oleks võimalik kasutada ka näiteks firma Caen poolt pakutavaid VME standardile vastavaid digitaliseerijaid, mis on samuti töötamissageduse ja vertikaalse lahusususe poolest paremad, kui PDA1000. Tabel 4 annab ülevaate antud töö käigus uuritud mõningate kiireimate digitaliseerijate ja aeg-digitaalmuundajate töökiirusest.

Tootja	Toote nimi	Töötamissagedus (GHz)	Kanalite arv	lugem <ulatus (bit)<="" th=""> <th>ribal<ulatus (mhz)<="" th=""> <th>mälu puhver</th> <th>digitaliseerija/aeg-digitalmuundaja</th> </ulatus></th></ulatus>	ribal <ulatus (mhz)<="" th=""> <th>mälu puhver</th> <th>digitaliseerija/aeg-digitalmuundaja</th> </ulatus>	mälu puhver	digitaliseerija/aeg-digitalmuundaja
Caen	DT5761 *	4	1	10		7.2MS/s	digitaliseerija
Caen	VME - V1742 *	5	32+2	12			digitaliseerija
Caen	VME - V1751	1 või 2	4 või 8	10	500	1.835 MS/kanal	digitaliseerija
Caen	VME - V X1751	1 või 2	4 või 8	10	500	4 MS/kanal	digitaliseerija
Caen	NIM - N6751	1 või 2 GS/s	2 või 4	10	500	1.835MS/kanal	digitaliseerija
GaGe	CobraMax USB	3 või 4	1 või 2	8	1500	256 MS - 4 GS	digitaliseerija
GaGe	CompuScope PX1500-	1,1	1 või 2	12 või 14	1200	128 MS	digitaliseerija
Signatec	4 PDA-	1,5 või 3		8	2000	2 GB	digitaliseerija
Signatec	1000	1	1	8	500	256 MB	digitaliseerija
Highland Technology	V660	kuni 41,0	12	32		256 lugemit / 8MB	aeg-digitalmuundaja
Highland Technology	M680	1	8	28			aeg-digitalmuundaja
Highland Technology	V980	20.48	16	48			aeg-digitalmuundaja
Agilent Technologies	Agilent U1051A	20	6	12		4M sündmust	aeg-digitalmuundaja
Agilent Technologies	Agilent U1050A	200 või 20	12	12		512 sündmust	aeg-digitalmuundaja
Acam	TDC GP1	8 või 4	1 või 2				aeg-digitalmuundaja
Acam	TDC-GP2	15,4	1 või 2				aeg-digitalmuundaja
Acam	TDC-GPX	100 või 37	2 või 8				aeg-digitalmuundaja
Acam	TDC-GPX-FG	24,4 või 12,3	2 või 8				aeg-digitalmuundaja

Tabel 4: Mõnede digitaliseerijate ja aeg-digitalmuundajate võrdlustabel. Tabelis on tooted, mille töötamissagedus on vähemalt 1 GHz (periood ≥ 1 ns).

Summary

The TOF electronics system can be improved by obtaining and installing a more powerful digitizer and/or time-to-digital converter. For the matter of conveniency and ease, the most appropriate upgrade would be getting a device analogical to PDA1000, that also would be PCI-compatible. The most powerful available such digitizers at the moment are GaGe CobraMax family member CS14G8 and Signatec's own newest released model in this field – PX1500-4.

The first of these two boards has slightly higher sampling rate (up to 4 GHz) and on-board memory (up to 4 GB), but a little less bandwidth (1,5 GHz). The vertical resolution of both of these boards is the same as that of PDA1000 digitizer board – 8 bits. In all other features, the two newer boards exceed the capabilities of the older PDA1000. Thus, in order to acquire more detailed data from time-of-flight experiments, it would be reasonable to exchange the current digitizer PDA1000 in the MAX laboratory against one of the newer of these two powerful boards. Comparative overview of the 3 digitizers is given in Figure 3.

In order to use other types of digitizers or time-to-digital converters in this system, the physical apparatus would have to undergo certain changes and reconfigurations. For example, other possible standards include VME (*Virtual Machine Environment*) and NIM (*Nuclear Instrumentation Module*). However, to measure time-of-flight it would be possible to use Caen produced VME digitizers, which also exceed PDA1000 in vertical resolution and sampling rate. Table 4 gives an overview of some of the fastest digitizers and time-to-digital converters, considering their sampling rate.

Kasutatud kirjandus

1. Jauhiainen, J., Aksela, S., Nömmiste, E. Flight Time Distribution and Collection Efficiency Studies for Time-of-Flight Mass Spectrometer – *Physica Scripta*, 1995, 51, 549-556.
2. Kukk, E. Ion TOF & PEPICO Data Acquisition Operation manual. University of Turku, 2008
3. Gage Applied Technologies [WWW]
http://www.gage-applied.com/products/pci_family.htm (25.05.10)
4. Gage Applied Technologies – pressiväljaanne [WWW]
http://www.gage-applied.com/News/archives/2009_04_08.htm (25.05.10)
5. Gage Applied Technologies – CobraMax CompuScope Family infoleht [WWW]
<http://www.gage-applied.com/products/PDF/CobraMax.pdf> (25.05.10)
6. Signatec, Incorporated [WWW]
<http://www.signatec.com/company/about-us.html> (25.05.10)
7. Wagner, T. Signatec Releases PX1500-4, Its 4-Channel, 1.5 GHz Per Channel / 2-Channel, 3 GHz Per Channel PCI-Express Digitizer with Two Virtex-5 FPGAs - PX1500-4. 2009, 1-2 [WWW]
<http://www.signatec.com/includes/pdf/PR-2009-12-17-Signatec-Releases-PX1500-4-Its-4-Channel-1.5-GHz-Per-Channel-2-Channel-3-GHz-Per-Channel-PCI-Express-Digitizer-with-Two-Virtex-5-FPGAs.pdf> (25.05.10)
8. Signatec, Incorporated – toote PX1500-4 infoleht [WWW]
<http://www.signatec.com/includes/pdf/PX1500-Data-Sheet-Rev1.01.pdf> (25.05.10)
9. Signatec, Incorporated – toote PDA1000 infoleht [WWW]
<http://www.signatec.com/includes/pdf/PDA1000-Data-Sheet-Rev1.00.pdf> (25.05.10)
10. CAEN S.p.A. - Waveform Digitizers [WWW]
http://www.caen.it/nuclear/PDF/catalog_2010/Waveform_Digitizers.pdf (25.05.10)
11. CAEN S.p.A. [WWW]
<http://www.caen.it/nuclear/product.php?mod=N6751> (25.05.10)
12. CAEN S.p.A. [WWW]
<http://www.caen.it/nuclear/product.php?mod=VX1751> (25.05.10)
13. CAEN S.p.A. [WWW]
<http://www.caen.it/nuclear/product.php?mod=V1751> (25.05.10)

14. CAEN S.p.A. [WWW]
http://www.caen.it/nuclear/coming_soon_syproduct.php?mod=V1742 (25.05.10)
15. CAEN S.p.A. [WWW]
http://www.caen.it/nuclear/coming_soon_syproduct.php?mod=DT5761 (25.05.10)
16. Highland Technology [WWW]
<http://www.highlandtechnology.com/Pages/copro2.html> (25.05.10)
17. Highland Technology [WWW]
<http://www.highlandtechnology.com/DSS/V660DS-O.html> (25.05.10)
18. Agilent Technologies
<http://www.agilent.com/about/companyinfo/index.html?cmpid=5012> (25.05.10)
19. Agilent Technologies - Agilent U1050A infoleht [WWW]
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7119EN.pdf> (25.05.10)
20. Acam [WWW]
<http://www.acam-usa.com/> (25.05.10)
21. Acam [WWW]
<http://www.acam-usa.com/GPX.html> (25.05.10)