

Iiro Mutikainen

HFT-JÄRJESTELMIEN TEHOKKUUDEN PARANTAMINEN



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
TIETOJENKÄSITTELYTIETEIDEN LAITOS
2016

TIIVISTELMÄ

Mutikainen, Iiro
HFT-järjestelmien tehokkuuden parantaminen
Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2016, 37 s.
Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja(t): Halttunen, Veikko

Teknologian kehittyminen on avannut uusia liiketoimintamahdollisuuksia myös finanssialalle. Automatisoitu arvopaperikaupankäynti on vakiinnuttanut asemansa arvopaperimarkkinoilla ja yritykset etsivät yhä parempia tapoja saavuttaa kaupankäyntietuja muihin kaupankävijöihin nähden. Automatisoidussa arvopaperikaupankäynnissä nopeuden on nähty olevan kaupankäynnissä eduksi, jolloin markkinamuutoksiin voidaan reagoida ennen muita kaupankävijöitä. Alan yritykset ovatkin ryhtyneet niin sanottuun nopeuskilpailuun ja pyrkivät tehostamaan kaupankäyntijärjestelmiään. Nopeasta automatisoidusta arvopaperikaupankäynnistä voidaan käyttää lyhennettä HFT (High Frequency Trading). Tämän kirjallisuuskatsaukseen pohjautuvan tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien tehokkuuteen ja millä tavalla nämä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien toimintaan. Tutkimuksesta kävi ilmi, että HFT-järjestelmien tehokkuuteen vaikuttaa laitteisto, ohjelmisto, laitteiston fyysinen sijainti sekä kaupankäynnissä käytetty strategia. Tutkimus antoi viitteitä kuitenkin myös siitä, että pelkkä HFT-järjestelmän tehokkuuden lisääminen ei välttämättä paranna kaupankäynnin menestystä, koska siihen vaikuttaa myös muun muassa kaupankäyntistrategian toimivuus. Näiden asioiden perusteella pääteltiin, että HFT-järjestelmää tehostettaessa tulee ottaa suorituskyvyn ohella myös muita asioita huomioon – pelkästä HFT-järjestelmän nopeuttamisesta ei välttämättä ole hyötyä.

Asiasanat: korkeataajuinen automatisoitu arvopaperikaupankäynti, algoritmeihin perustuva kaupankäynti, tehokkuus

ABSTRACT

Mutikainen, Iiro

Improving HFT-systems' performance

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2016, 37 p.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor(s): Halttunen, Veikko

Superior technology has unleashed new business models in finance, too. Algorithmic trading has established its position in stock markets and companies are looking for new tools to reach trading advantages compared to other companies. High speed has been discovered to be an important factor in algorithmic trading because therefore stock market changes can be discovered before other traders. So said speed race has therefore risen among companies while they are aiming to accelerate their trading systems. Fast algorithmic trading is well known as HFT (High Frequency Trading). This literature based review's goal was to find factors that have effect on the efficiency of HFT system. It was also purposed to determine on how these factors affect HFT systems. It was found out that the factors that have effect on the efficiency of HFT system are hardware, software, location of the system and HFT strategy. This review also suggested that not only trading system's performance increases success of trading because functionality of trading strategy affects it, too. Therefore it was found out that an efficient HFT system seemed to be result from many factors. In addition to HFT system's performance, other factors must be taken into consideration while enhancing efficiency of HFT system.

Keywords: high frequency trading, algorithmic trading, performance, efficiency

KUVIOT

KUVIO 1 FPGA-piirin perusarkkitehtuuri (Monmasson & Cirstea, 2007).	10
KUVIO 2 CPU:n, GPU:n ja FPGA:n suorituskyky (Aldridge, 2013, 25; [Thomas, Howes & Luk, 2009]).	11
KUVIO 3 Suorittimien ja FPGA-piirien suorituskyvyn ja kehittämisen suhde (Lockwood ym., 2012).	12
KUVIO 4 FIX-viesti (Aldridge, 2013, 27).	14
KUVIO 5 Pilkottu FIX-viesti UDP-paketissa (Leber ym., 2011).	15

TAULUKOT

TAULUKKO 1 Eri ratkaisuiden kokonaisviiveet mikrosekunteina (Sadoghi ym., 2010).	18
TAULUKKO 2 Etäisyyden vaikutus viiveeseen (Aldridge, 2013, 31).	28

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT

TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	KORKEATAAJUINEN AUTOMATISOITU ARVOPAPERIKAUPANKÄYNTI	8
	2.1 Kaupankäyntistrategiat	8
	2.2 FPGA-piirit	10
	2.3 Ohjelmisto.....	13
3	HFT-JÄRJESTELMIEN VAATIMUKSET	16
	3.1 Tehokkuus	16
	3.2 Turvallisuus.....	19
	3.3 Riskienhallinta.....	20
4	HFT-JÄRJESTELMIEN TOIMINNAN TEHOSTAMINEN.....	24
	4.1 Laitteistovalinnat	24
	4.2 Ohjelmistovalinnat	26
	4.3 Laitteiston fyysinen sijainti.....	27
	4.4 Strategiariippuvaisuus.....	28
	4.5 Yhteenveto	30
5	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET	35

1 JOHDANTO

Arvopaperikauppa algoritmeihin perustuvilla automaattisilla tietojärjestelmillä on vakiinnuttanut asemansa arvopaperimarkkinoilla. Algoritmeihin perustuva arvopaperikaupankäynti AT (Algorithmic Trading) tarkoittaa arvopaperikauppaa, jossa arvopaperin osto- tai myyntipäätös tehdään automaattisesti algoritmin toimesta (Hendershott & Riordan, 2011). Ihmisen sijaan kaupankäyntipäätöksen tekee siis algoritmi, joka toimii ennalta määritetyllä tavalla. Algoritmin toimintaperiaate ja kaupankäyntipäätökset perustuvat strategiaan, jolla pyritään maksimoimaan kaupankäynnistä saatava tuotto. AT:ssä on erilaisia kaupankäyntistrategioita, jotka riippuvat muun muassa kaupankävijästä sekä arvopaperista, jolla kauppaa käydään. Joidenkin arvioiden mukaan AT:n osuus kaikesta arvopaperikaupasta oli jopa 73 prosenttia Yhdysvalloissa vuonna 2009 (Hendershott, Jones & Menkveld, 2011). Teknologian kehittyessä automatisoitu arvopaperikaupankäynti tulee todennäköisesti kasvattamaan asemaansa arvopaperimarkkinoilla yhä enemmän. Arvopaperikaupan automatisoituminen onkin herättänyt yritykset etsimään tuottomahdollisuuksia. Tilanne on eskaloitunut siihen pisteeseen, että tuottoa hakevat yritykset kehittävät järjestelmiään yhä tehokkaimmiksi ja näin ollen AT on saanut uuden ulottuvuuden, korkeataajuisen arvopaperikaupankäynnin HFT:n (High Frequency Trading).

Suurin osa aiheeseen liittyvistä tutkimuksista käsittelee HFT:tä taloustieteellisestä näkökulmasta ja esimerkiksi tämän vaikutuksista arvopaperimarkkinoihin. Aihe onkin herättänyt jonkin verran vastakkainasettelua HFT:n markkinavaikutuksista ja siitä, onko HFT eettisesti reilua muita markkinatoimijoita kohtaan. Samaan aikaan HFT-järjestelmien tehokkuuden tarkastelu teknisestä näkökulmasta on jäänyt hieman vähemmälle ja yritysten tehokkuuskilpailu jatkuu. On toki ymmärrettävää, että HFT-järjestelmien tekninen tarkastelu on jäänyt tieteellisellä tasolla vähemmälle. Tämän voidaan arvella johtuvan muun muassa siitä, että menestyvät HFT-yritykset eivät luonnollisesti halua paljastaa liiketoimintatasalaisuuksiaan julkiseen tarkasteluun. Sen lisäksi, HFT:n ja sen teknisten ratkaisujen kokonaisvaltainen ymmärtäminen ja tarkastelu vaativat moniulotteista osaamista sekä arvopaperimarkkinoista, että tietojärjestelmistä.

Useasti osaaminen keskittyy ainoastaan toiseen näistä, jolloin myös aiheen tarkastelu on suppeampaa.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan HFT-järjestelmien toiminnan tehostamista. Tutkimuksessa selvitetään HFT-järjestelmien tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja näiden tapaa vaikuttaa HFT-järjestelmien toimintaan. Tavoitteena on rakentaa ymmärrettävä kuvaus siitä, mitä asioita HFT-järjestelmien tehostamisen taustalla on ja miten ne vaikuttavat teknisiin ratkaisuihin. Tällöin HFT-järjestelmien teknisten (tietojärjestelmät) ja taloudellisten (arvopaperimarkkinat) ulottuvuuksien välille voidaan löytää synteesiä. Tutkimus luo myös raamit mahdollisille jatkotutkimuskohteille aiheeseen liittyen. Tutkielman tutkimusongelmat voidaan määrittää seuraavin tutkimuskysymyksin:

- Mitkä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien tehokkuuteen?
- Millä tavoin nämä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien toimintaan?

Tutkimus on kirjallisuuskatsaus, joka pohjautuu sekä tekniseen, että myös taloustieteelliseen lähdemateriaaliin. Lähdemateriaali on hankittu erilaisista tieteellisistä hakukoneista sekä tietokannoista ja hakusanoina on käytetty aiheeseen liittyviä käsitteitä. Lähdemateriaalin arvioimisen kriteereinä on käytetty Julkaisufoorumin tasoluokitusta, viittausten määrää, tekijän tai tekijöiden aiempaa alan kontribuutiota sekä julkaisun yhtenäisyyttä muiden tutkimusten kanssa. Käytettyjä lähteitä on tarkasteltu myös kriittisesti ja julkaisuille on pyritty löytämään tukea myös muista julkaisuista.

Luvussa 2 kerrotaan HFT-kaupankäynnistä. Tarkasteltavia asioita ovat HFT-järjestelmien yleisimmät tekniset, kuten laitteisto- ja ohjelmistoratkaisut. Luvussa esitellään myös HFT-kaupankäynnin yleisimmät kaupankäyntistrategiat. Luku 3 käsittelee HFT-järjestelmiin liittyviä vaatimuksia. Luvussa esitellään HFT-ratkaisuiden taustalla olevat vaatimukset, joita ovat tehokkuus, turvallisuus sekä riskienhallinta. Luvussa kerrotaan myös syyt siihen, miksi nämä vaatimukset tulee ottaa huomioon HFT-järjestelmissä. Neljännessä luvussa käsitellään HFT-järjestelmien toiminnan tehostamista. Analyysin pohjana ovat luvussa kaksi todetut yleisimmät HFT-järjestelmien ratkaisut sekä luvussa kolme käsitellyt HFT-järjestelmien vaatimukset. Luvussa puntaroidaan myös tehokkuuden merkitystä eri HFT-kaupankäyntistrategioissa. Tutkielman viides luku on yhteenveto, jossa käydään läpi tutkimuksen oleelliset tulokset suhteessa tutkimusongelmiin, puntaroidaan tulosten merkitystä sekä kerrotaan esiin tulleista mahdollisista jatkotutkimuskohteista aiheeseen liittyen.

2 KORKEATAAJUINEN AUTOMATISOITU ARVOPAPERIKAUPANKÄYNTI

Korkeataajuinen automatisoitu arvopaperikaupankäynti HFT (High Frequency Trading) pitää sisällään erilaisia algoritmeilla ohjattuja strategioita, joilla pyritään tekemään voittoa arvopaperimarkkinoilla. HFT on täten algoritmeilla ohjattun arvopaperikaupankäynnin (AT) osa-alue, jossa hyödynnetään nopeaa teknologiaa, jotta kaupankäyntialgoritmi toimii mahdollisimman tehokkaalla tavalla. (Gomber, Arndt, Lutat & Uhle, 2011.) Tarkoituksena on käydä kauppaa arvopapereilla ja tehdä voittoa. Myös HFT:n osuutta on pyritty arvioimaan kaikesta arvopaperikaupasta. Kirilenko, Kyle, Samadi ja Tuzun (2015) tutkivat Flash Crash -pörssiromahdusta ja sitä myötä S&P 500 -futuureiden kaupankäyntiä, joka oli tapahtunut 3.5-6.5.2010. He totesivat, että noin 35 prosenttia oli tehty HFT:n toimesta. HFT:ssä käytetään erittäin nopeita ja kehittyneitä tietokoneohjelmia kaupankäynnissä. Sen lisäksi tehokkuuden parantamiseksi käytetään suoraa markkinasyötettä. Ominaispiirteitä ovat myös arvopapereiden lyhytaikainen hallussapito, sekä niistä luopuminen kaupankäyntipäivän aikana. Myös toimeksiannot voidaan perua nopeasti toimeksiannon teon jälkeen. (SEC, 2010.) Tässä tutkielmassa käytetään aiheesta englannin kielestä johdettua lyhennettä HFT, koska se on alalla eniten käytetty, eikä aiheelle löydy vakiintunutta suomalaista käsitettä.

2.1 Kaupankäyntistrategiat

Kuten AT:ssä, myös HFT:ssä järjestelmä toimii tietyn strategian mukaan, joka on ennalta määritetty algoritmiin. Erilaisia strategioita on useita ja valittu strategia riippuu muun muassa kaupankävijästä sekä arvopaperista, jolla kauppaa käydään. Sen lisäksi kaikkia käytettyjä strategioita ei välttämättä edes ole tiedossa, koska yritykset eivät varmastikaan halua paljastaa niitä. Jokaisen strategian tarkka määrittelemine on vaikeaa, koska ne saattavat erota toisistaan kaupankävijästä ja esimerkiksi tuottovaatimuksesta riippuen. Jokaisen strategi-

an perimmäinen tarkoitus on kuitenkin tuottaa voittoa kaupankävijälle. Strategia itsessään määrittelee tavan, jolla kyseinen päämäärä pyritään saavuttamaan. HFT-strategioita on useita ja erään määritelmän mukaan ne perustuvat makrotason ilmoituksiin kuten uutisiin, ja likviditeetin tarjoamiseen markkinoille (Brogaard, Hendershott & Riordan, 2014). Vaikka kaikkia HFT-strategioita ei voida täydellä tarkkuudella esittää, voidaan ne jakaa neljään eri pääluokkaan (Aldridge, 2013):

- Arbitraasi
- Tapahtumiin perustuva kaupankäynti
- Market making
- Muut, kyseenalaiset strategiat

Arbitraasi itsessään tarkoittaa riskitöntä tuottoa. Taloustieteessä tunnetaan esimerkiksi Rossin (1976) esittelemä arbitraasihinnointiteoria APT (Arbitrage pricing theory), jonka mukaan sijoittajien on mahdollista saada tuottoa ilman riskiä tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Vaatimuksena on muun muassa se, että kauppaa käydään kahdella arvopaperilla, joista vähintään toisen on oltava niin sanotusti väärin hinnoiteltu. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että sijoittaja saa ostetusta arvopaperista paremman hinnan toisella markkinapaikalla.

HFT:n arbitraasistrategiassa etsitään tehottomia hinnoitteluja arvopapereiden tai pörssien välillä. Arbitraasistrategiat, joissa käydään kauppaa tietyillä arvopapereilla eri pörssien välillä, ovat riippuvaisia matalasta viiveestä (Aldridge, 2013). Arbitraasitilanteet poistuvat markkinoilta nopeasti, joten tämän vuoksi alhaisen viiveen merkitys korostuu tässä strategiassa. Aihetta käsitellään tässä tutkielmassa myöhemmin. Lyhykäisyydessään arbitraasia voidaan siis kuvata siten, että markkinoilla on väärin hinnoiteltuja arvopapereja, joiden avulla sijoittaja tekee voittoa.

Tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä arvopaperin hinnanmuutokset ovat riippuvaisia markkinoilla tapahtuvista julkistuksista, kuten uutisista ja muista tapahtumista. HFT:ssä pyritään käyttämään hyväksi markkinoiden reaktioita näihin tapahtumiin ja muodostaa tuottavia positioita arvopapereilla (Aldridge, 2013). Uutissyötettä voidaan lukea automatisoidusti ja esimerkiksi sanakombinaatioita lukemalla voidaan saavuttaa yli 60 prosentin tarkkuus arvioitaessa uutisen aiheuttamia markkinareaktioita (Hagenau, Liebmann, Hedwig & Neumann, 2012). HFT-kaupankävijän saama etu on nimenomaan se, että markkinareaktioihin kyetään reagoimaan ennen muita sijoittajia (Foucault, Hombert & Rosu, 2016).

Market making -strategiassa asetetaan sekä osto- että myyntitoimeksiantoja arvopaperin markkinahinnan molemmille puolille tietyillä hinnoilla. Mainittua strategiaa toteuttava kaupankävijä tarjoaa tällöin likviditeettiä markkinoille ja auttaa portaittain toimeksiantojen toteuttamisessa, koska on epätodennäköistä, että myynti- ja ostotoimeksianto kohtaavat täysin hinnan sekä määrän puolesta. (Aldridge, 2013; SEC, 2010.) Hänen tavoitteena on ostaa arvopaperi mahdollisimman alhaisella hinnalla ja myydä se marginaalisella voitolla. Kaupankävijä

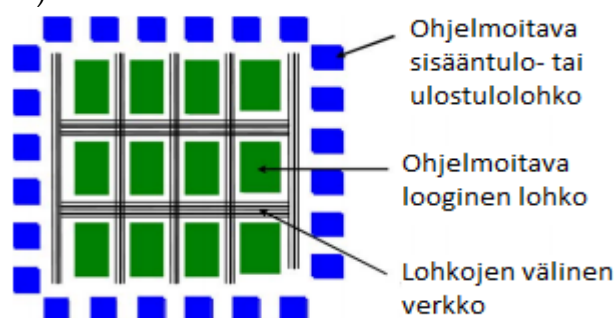
tavallaan toimii välikätenä kahden muun sijoittajan välillä, jotka eivät pääse arvopaperin hinnasta yhteisymmärrykseen. Kyseisessä strategiassa siis toimitaan likviditeetin tarjoajana markkinoille ja pyritään tekemään marginaalista voittoa samalla kun eri sijoittajien hintarajojen erot pienenevät.

On olemassa myös kiistanalaisia ja lainsäädännöllisesti rajoitettuja strategioita, joita voidaan käyttää HFT:ssä. Muun muassa näistä strategioista johtuen osa ihmisistä näkee HFT:n huonona asiana markkinoille. Joissain strategioissa voidaan pyrkiä muun muassa manipuloimaan arvopaperimarkkinoita ja sitä kautta aiheuttaa pörssiromahdus. (Aldridge, 2013.) Tässä tutkielmassa kuitenkin käsitellään ensin mainittuja yleisimpiä HFT-strategioita.

2.2 FPGA-piirit

HFT-järjestelmien laitteisto eroaa normaaleista tietokoneista monella tapaa. Teknologian kehittyminen ja komponenttien hintojen lasku on vaikuttanut myös HFT-järjestelmien kehitykseen. Tarvitaan yhä tehokkaampia komponentteja, jotta nopeassa kaupankäynnissä saadaan etua muihin kaupankävijöihin nähden. Laitteistotasolla HFT-järjestelmissä käytetään usein FPGA (Field-programmable gate array) -piirejä. Tässä alaluvussa esitellään FPGA-piirit sekä niiden hyödyt ja haitat HFT-järjestelmissä.

FPGA-piirit ovat ohjelmitavia komponentteja, jotka koostuvat toisiinsa yhteydessä olevista loogisista lohkoista. Muistialkiot hallitsevat lohkojen sekä yhteyksien toimimista, jolloin piiri toimii halutulla tavalla. FPGA-piireissä voidaan käyttää useita erilaisia muistityyppejä. Edellä mainitut loogiset lohkot on liitetty yhteen matriisimuodostelmaan. Niitä ympäröi sisään- ja ulostulolohkot. Kaikki lohkot ovat yhteydessä toisiinsa ohjelmitavan kytkentäverkon avulla. (Monmasson & Cirstea, 2007.) Tässä esimerkki FPGA-piirin perusarkkitehtuurista (kuvio 1):

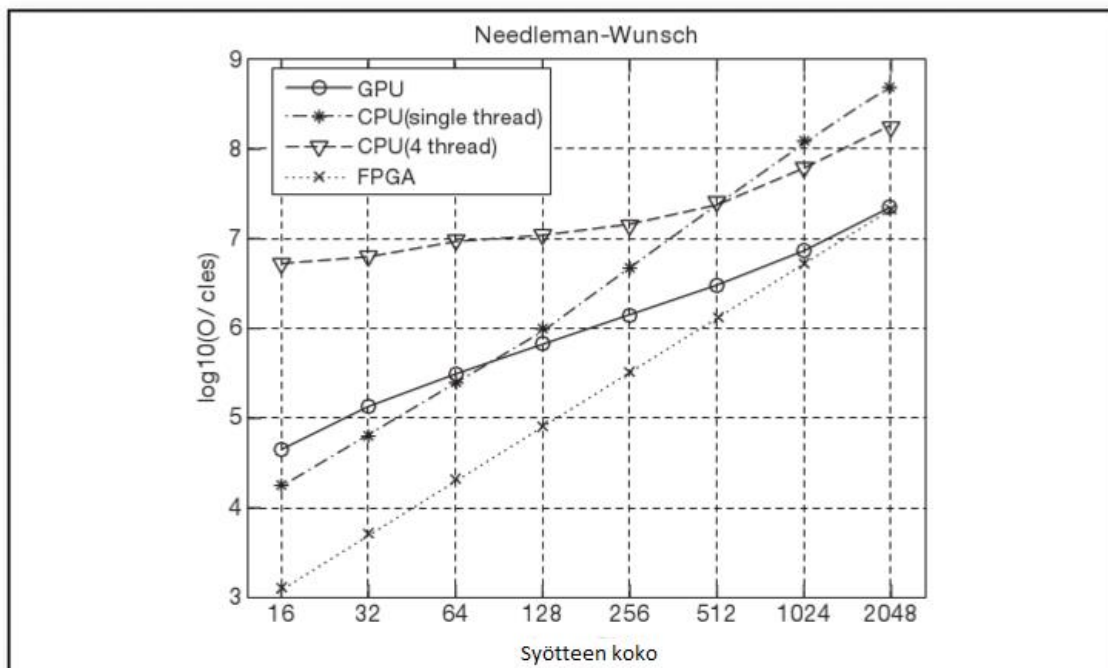


KUVIO 1 FPGA-piirin perusarkkitehtuuri (Monmasson & Cirstea, 2007).

FPGA-piirit ovat yleisesti käytettyjä tehokkuutta vaativissa toimenpiteissä ja esimerkiksi monet supertietokoneet ovat FPGA-pohjaisia (Awad, 2009). Tutkimusten mukaan FPGA-piireillä saavutetaan parempi suorituskyky esimerkiksi suorittimeen (CPU) verrattuna. Sen lisäksi FPGA-piirien kerrotaan olevan hel-

pommin sovitettavissa muun järjestelmän kanssa. FPGA-piirit onkin alun perin kehitetty sulautettuihin järjestelmiin muun muassa laskentatehon, uudelleenkonfiguroinnin ja tuettujen protokollien takia (Malinowski & Yu, 2011).

FPGA-piirien laskentatehoa voidaan havainnollistaa vertaamalla sitä tavallisiin suorittimiin (CPU) tai nykyään jo tehokkaisiin grafiikkakortteihin (GPU) (ks. kuvio 2). Gomez-Pulido, Vega-Rodriguez, Sanchez-Perez, Priem-Mendes ja Carreira (2011) vertasivat FPGA-piirien, CPU:n ja GPU:n kykyä suorittaa erilaisista monimutkaisista algoritmeista erilaisissa tilanteissa. Tutkimuksen mukaan FPGA-piirit ovat suorittimia tehokkaampia erityisesti rinnakkaisessa laskennassa. FPGA-piirien eduksi mainitaan myös GPU:ta alhaisempi virrankulutus. Kuviossa 2 esitetään Aldridgen (2013) visualisointi suorituskykyeroista.



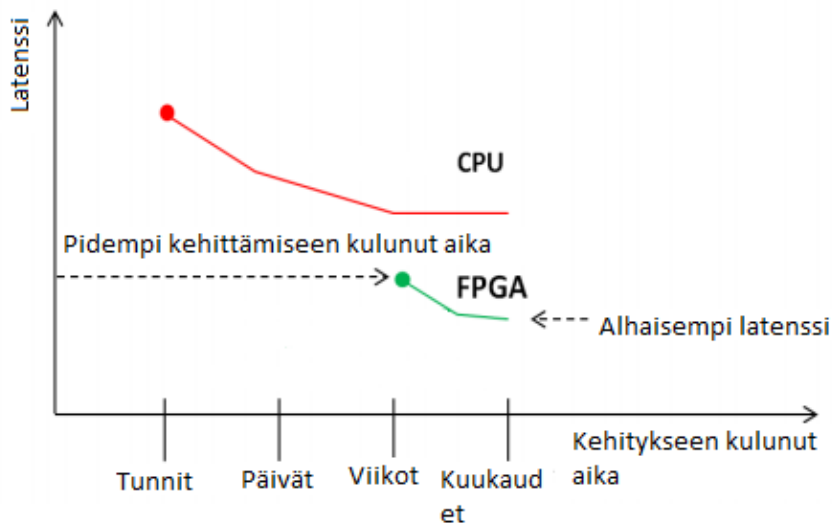
KUVIO 2 CPU:n, GPU:n ja FPGA:n suorituskyky (Aldridge, 2013, 25; [Thomas, Howes & Luk, 2009]).

Kuviosta 2 käy ilmi, että FPGA-piirit ovat huomattavasti tehokkaampia muihin verrattuna. Tämä korostuu erityisesti pienemmän syötteen käsittelyssä. Toisaalta, syötteen kasvaessa tarpeeksi suureksi ei GPU:n ja FPGA:n suorituskykyjen välillä ole juurikaan eroa.

HFT-järjestelmien laitteistossa käytetään FPGA-piirejä edellä mainitun hyvän suorituskyvyn vuoksi. FPGA-piirien käyttöön liittyy kuitenkin myös muita etuja. Sadoghi, Labrecque, Singh, Shum ja Jacobsen (2010) esittävät, että FPGA-piirejä on helppo konfiguroida ja kustomoida kun toisaalta normaalit suorittimet vaativat usein myös monimutkaista ylläpitoa ohjelmisto- sekä käyttöjärjestelmätasolla. Sadoghi ym. (2010) mainitsevat myös, että FPGA-piiriin perustuvalla ratkaisulla saavutetaan tehokas suorituskyky juuri edellä mainitun rinnakkaisen laskennan takia, jolloin ylimääräistä latenssia ei synny.

Lockwood, Gupte ja Mehta (2012) mainitsevat FPGA-piirien eduiksi edellä mainittujen lisäksi myös monipuolisuuden, jonka vuoksi piirit voidaan implementoida melkein mihin tahansa HFT-ohjelmistoon. He sanovat myös, että FPGA-piireillä on myös helpompi käsitellä protokollia, koska dataa voidaan käsitellä jo bittitasolla.

FPGA-piirien käytössä on toisaalta myös joitakin haittapuolia. Lockwoodin ym. (2012) mukaan esimerkiksi FPGA-piirien kehittäminen on monimutkaisempaa verrattuna tavanomaisiin ratkaisuihin. Monet finanssialan ohjelmistokehittäjät eivät tunne FPGA-piirejä yleisellä tasolla ja heillä ei ole tarpeeksi ammattitaitoa käyttää laitteisto-orientoituneita kehitystyökaluja. FPGA-piirien valmistaminen on myös hitaampaa ja sitä myötä kalliimpaa suorittimiin (CPU) verrattuna, koska niiden abstraktiotaso on matalampi. Lockwood ym. (2012) ovat kuitenkin sitä mieltä, että FPGA-piirin parempi suorituskyky ja latenssin vähäisyys ovat taloudellisesti kannattavia mahdollisesta investoinnista huolimatta (ks. kuvio 3).



KUVIO 3 Suorittimien ja FPGA-piirien suorituskyvyn ja kehittämisen suhde (Lockwood ym., 2012).

HFT-järjestelmien laitteisto pohjautuu siis ohjelmitaviin FPGA-piireihin, joilla saavutetaan tehokas suorituskyky ilman ylimääräistä viivettä eli latenssia. Niitä on helppo konfiguroida ja kustomoida eivätkä ne vaadi monimutkaista ylläpitoa käyttöjärjestelmätasolla (Sadoghi ym., 2010). Vaikka FPGA-piirit ovat verrattain kalliita ja monimutkaisia valmistaa, kannattaa niitä silti käyttää pidemmän aikavälin tuottoa ajatellen (Lockwood ym., 2012).

2.3 Ohjelmisto

HFT-järjestelmien ohjelmistoratkaisuilla voidaan vähentää kokonaislatenssia, mutta huomioon on otettava myös turvallisuus sekä virheenkorjaus. Tällöin pelkästään latenssin loputon minimoiminen ei ole mielekäästä. Tässä luvussa käydään läpi HFT-järjestelmien toiminta ohjelmistotasolla. Esiteltäviä asioita ovat viestintäprotokollat, turvallisuus ja algoritmit.

HFT-järjestelmissä ohjelmistot viestivät toisilleen kolmea eri protokollatyyppiä hyödyntäen. Kaksi alimman tason protokollaa ovat UDP (User Datagram Protocol) sekä TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Ylimmällä tasolla käytetään finanssialalle kehitettyjä markkinaviestintäprotokollia, kuten FIX (Financial Information eXchange) -protokollaa. (Aldridge, 2013.) Käytettävä protokolla riippuu siis siirrettävän tiedon tyylistä. Jos siirretään tärkeää informaatiota, tulee protokollan olla tarpeeksi luotettava taikka suojattu.

UDP (User Datagram Protocol) on pakettivälitteisessä verkossa käytetty protokolla, jonka toimintaperiaate hyvin yksinkertainen, eikä pakettien välittämistä taata tiedonsiirrossa (Postel, 1980). Aldridge (2013) toteaaakin, että yksinkertaisuudestaan johtuen tiedonsiirto UDP-protokollaa käyttäen on hyvin nopeaa. Arvopaperikaupankäynnissä UDP-protokollaa käytetään esimerkiksi välittämään pörssikursseja pörssistä kaupankävijälle (Aldridge, 2013). Muun muassa Lockwood ym. (2012) käyttävät HFT-järjestelmän viitekehyksessään UDP-protokollaa markkinatiedon välittämiseen. Kurssit päivittyvät jatkuvasti, jolloin yksittäisten pakettien katoaminen ei välttämättä ole haitaksi kaupankävijälle, koska kaupankävijälle tulee jatkuvasti uutta tietoa pörssikursseista uusien pakettien muodossa. Toisaalta, jotkut kaupankäyntistrategiat saattavat perustua siihen, että ne ennustavat tulevia markkinamuutoksia menneiden kurssien perusteella. Jos pörssikurssit eivät vastaa kaupankäyntitilannetta algoritmin kehitysvaiheessa, saattaa algoritmi toimia väärällä tavalla myöhemmin itse kaupankäynnissä. Siitä syystä on tärkeää varmistaa, että esimerkiksi algoritmin testausvaiheessa käytettävä pörssikurssidata päivittyy yhtä usein kuin itse tuotantovaiheessa eli kaupankäynnissä. (Aldridge, 2013.)

TCP/IP-protokolla on yhdistelmä TCP sekä IP-protokollista. TCP-protokollassa muodostetaan yhteys paketin lähettäjän sekä vastaanottajan välille, jolloin erilaisten tilojen avulla voidaan kommunikoida ja sitä myötä taata paketin perille pääsy (Socolofsky & Kale, 1991). Pakettien perille pääsy taataan siten, että jokaisen paketin vastaanottamisen jälkeen lähettäjälle kuitataan tieto siitä, että paketti on vastaanotettu. Jos lähettäjä ei saa kuittausta, paketti lähetetään uudelleen. (Socolofsky & Kale, 1991; Fall & Stevens, 2011.) TCP-protokollan luotettavuus toisaalta vähentää suorituskykyä, minkä vuoksi yllä mainittu UDP-protokolla onkin nopeampi kuin TCP. Lakshman ja Madhow (1997) toteavatkin, että TCP-protokollan suorituskyky heikkenee erityisesti laajoissa verkoissa (WAN – Wide Area Network), jolloin useat TCP-yhteydet käyttävät samaa linkkiä, joka voi ruuhkautua paketeista. Tämän toteavat myös Li,

Leith ja Shorten (2007), jotka vertailevat erilaisten TCP-protokollien suorituskykyä WAN-verkoissa eri ruuhkanhallinta-algoritmeilla.

Aldridge (2013) sanoo, että arvopaperikaupassa TCP-protokollaa käytetään tärkeiden tietojen siirtämiseen. Hänen mukaansa tärkeää tietoa ovat muun muassa toimeksiannot ja näihin liittyvät ilmoitukset sekä peruuttamiset. TCP-protokollaa on siis käytettävä, kun halutaan pitää tiedonsiirron luotettavuus hyvällä tasolla.

IP (Internet Protocol) on protokolla, joka ohjaa pakettivälitteisen verkon paketit oikealle vastaanottajalle IP-osoitteiden avulla. (Postel, 1981.) IP-protokolla siis ohjaa ylemmän tason, kuten UDP:n ja TCP:n paketit verkossa oikealle vastaanottajalle, minkä seurauksena UDP ja TCP ovat riippuvaisia IP-protokollasta.

Alemman tason protokollat, kuten UDP, TCP ja IP eivät itsessään riitä kuljettamaan pörssi-informaatiota. Tätä varten ylimmälle tasolle, sovelluskerrokseen, on kehitetty esimerkiksi *FIX (Financial Information exChange)*-protokolla. FIX Trading Community (2016) kuvaa protokollaa seuraavalla tavalla:

FIX-protokolla on sarja erilaisia viestintätapoja elektroniseen kommunikaatioon ja toimeksiantoihin liittyviin viesteihin. Se on kehitetty yhdessä pankkien, pörssimeklareiden, pörssien, teollisuuden järjestöjen, sijoittajien ja informaatioteknologian tarjoajien kanssa. Näillä markkinatoimijoilla on sama näkemys yhteisestä, globaalista kielestä automatisoituun pörssikaupankäyntiin.

Suurin osa pörsseistä käyttää FIX-protokollaa tiedonsiirtoon. FIX-protokollasta on myös modifioitu protokolla FAST (FIX Adapted for Streaming), joka on optimoitu nopeaan tiedonsiirtoon. Tässä yhteydessä ei ole tarpeellista käsitellä FIX ja FAST-protokollien yksityiskohtaisia eroja. FAST tarkoittaa muokattua FIX-protokollaa, jota käytetään nopeassa tiedonsiirrossa (Litz, Leber & Geib, 2011).

FIX perustuu XML:ään ja se sisältää tietoa tarjouksista, toimeksiannoista, kaupoista ja niihin liittyvistä viesteistä (Aldridge, 2013). FIX-protokolla osaa eritellä viestin informaation numeroihin perustuvalla määrittelyllä, jossa jokaisesta numerosta vastaava kohta pitää sisällään jotakin tietoa (Aldridge, 2013; Kohlhoff & Steele, 2003). Seuraavaksi esitetään yksittäinen FIX-viesti, jossa näkyy Yhdysvaltain dollarin ja Kanadan dollarin kurssi (kuvio 4):

```
8=FIX.4.2 | 9=309 | 35=S | 34=5015 | 52=20070731-15:25:20 |
131=1185895365 | 301=0 | 55=USD/CAD | 167=FOR | 15=USD |
132=1.065450 | 133=1.065850 | 134=5000000.0 | 135=5000000.0 |
647=2000001.0 | 648=2000001.0 | 188=1.06545 | 190=1.06585 |
60=20070731-15:25:20 | 40=H | 64=20070801 | 10=178
```

KUVIO 4 FIX-viesti (Aldridge, 2013, 27).

Kuviosta 4 näkyy eri informaation erittely viestissä. Esimerkiksi ensimmäisessä kentässä numero 8 kuvaa käytetyn FIX-protokollan versionumeroa. Numerolla 8 identifioidaan siis versionumero. Eri kentät on tässä eritelty poikkiviivalla. Numero 52 erittelee viestin aikaleiman ja esimerkiksi numerosta 15 käy ilmi kaupankäynnin pohjavaluutta. (Aldridge, 2013.)

Kuten edellä mainittiin, FIX-protokolla toimii ylimmällä tasolla sovelluskerroksessa. FIX-viestit välitetään käyttäen alemman tason, kuten UDP tai TCP-protokollia. Tällöin FIX-viesti pilkotaan useampaan osaan ja kapseloidaan esimerkiksi UDP-ikkunaan (Aldridge, 2013; Leber, Geib & Litz, 2011). Leber ym. (2011) esittävät julkaisussaan FIX-viestin UDP-ikkunassa (ks. kuvio 5). FIX:n lisäksi olemassa on myös muita markkinaprotokollia, joita ei kuitenkaan käsitellä tässä tutkielmassa.

PMAP1	TID1	VIESTI1	PMAP2	TID2	VIESTI2		PMAPn	TIDn	VIESTIn
Viesti 1			Viesti 2				Viesti n		
UDP-ikkuna									

KUVIO 5 Pilkottu FIX-viesti UDP-paketissa (Leber ym., 2011).

HFT-järjestelmien tiedonsiirrossa käytetään useimmiten TCP-, UDP- ja FIX-protokollia. Käytettävä protokolla riippuu siitä, kuinka luotettavaa ja toisaalta tehokasta tiedonsiirron halutaan olevan. Luotettavaa TCP-protokollaa todettiin käytettävän silloin, kun tiedon halutaan pääsevän perille, eikä pakettien katoamista voida sallia. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi pörssi- ja kaupankäynnin myynti- ja ostotoimeksiannot.

Nopeaa perusprotokollaa UDP:tä voidaan käyttää HFT-järjestelmissä esimerkiksi markkinatiedon välittämiseen. Koska UDP-protokollassa ei taata tiedonsiirtoa on se nopeampi ja tehokkaampi kuin TCP-protokolla. Tämän vuoksi UDP-protokollaa todettiin käytettävän ei-kriittisessä, mutta toisaalta nopeutta vaativassa tiedonsiirrossa.

FIX-protokollan todettiin toimivan viestinnän alimmalla tasolla tarkoittaen sitä, että FIX-viestit kuljetetaan yllä mainittujen TCP- ja UDP-protokollien avulla. FIX-protokollan lisäksi alimmalla tasolla voidaan käyttää myös muita markkinaprotokollia, kuten FAST:a.

3 HFT-JÄRJESTELMIEN VAATIMUKSET

Edellisessä luvussa käsiteltiin HFT-järjestelmien ominaispiirteitä laitteiston sekä ohjelmiston kannalta. Tässä luvussa tarkastellaan HFT-järjestelmien vaatimuksia eri näkökulmista ja tarkastellaan syitä edellä mainittuihin laitteisto- ja ohjelmistoratkaisuihin HFT-järjestelmien vaatimusten kannalta. Käsiteltäviä aiheita ovat tehokkuus, turvallisuus sekä riskienhallinta.

3.1 Tehokkuus

Kuten aiemmissa luvuissa on kerrottu, HFT-järjestelmät yritetään saada toimimaan mahdollisimman tehokkaalla tavalla. Tässä tutkielmassa tehokkuudella tarkoitetaan HFT-järjestelmän nopeutta toimia erilaisissa tilanteissa. Tehokkuus pitää sisällään järjestelmän laskentakyvyn sekä muut nopeuteen vaikuttavat tekijät, kuten verkkoviiveen eli latenssin. HFT-yritykset yrittävät saavuttaa etua muihin nähden kaupankäynnissä. Tehokkuus on avaintekijä, jota parantamalla voidaan parantaa omaa asemaa arvopaperimarkkinoilla.

Tutkimuksista ja kirjallisuudesta löytyy paljon tukea tehokkuuden hyötyihin HFT-kaupankäynnissä. Useimmissa HFT-kaupankäyntiin liittyvissä julkaisuissa ainakin sivutaan tehokkuutta jollakin tasolla. Muun muassa Narang (2013) sanoo, että tehokkuus merkitsee jokaisessa arvopaperikaupankäyntistrategiassa. Savani (2012) toteaa puolestaan, että HFT-yritykset ovatkin ryhtyneet niin sanottuun nopeuskilpailuun. Baronin, Broogardin, Hagströmerin ja Kirilenkon (2016) tutkimus puolestaan todistaa sen, että nopeimmat HFT-yritykset saavat enemmän tuottoa hitaampien järjestelmien omaaviin yrityksiin verrattuna. Tutkimuksessa havaittiin, että nopeilla yrityksillä kaupankäynnin volyyymi on suurempaa, jolloin saavutetaan myös suuremmat voitot. He arvioivat myös, että nopeimmat yritykset löytävät eniten edullisia kaupankäyntipositioita, jolloin tehokkuuden merkitys korostuu erityisesti arbitraasiin pohjautuvissa strategioissa sekä Market making -strategiassa. Tehokkuuden ja kaupankäyntistra-

tegioiden suhdetta käsitellään tässä tutkielmassa myöhemmin. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että nopea HFT-järjestelmä on tuottavampi hitaampaan järjestelmään verrattuna (Brogaard ym., 2016). Tämän vuoksi HFT-järjestelmän tehokkuus pyritään maksimoimaan.

HFT-järjestelmien tehokkuutta voidaan arvioida kokonaisviiveen avulla. Aiheeseen liittyen on tehty muutamia julkaisuja, joissa mitataan HFT-järjestelmän kokonaisviivettä erilaisilla järjestelmäratkaisuilla. Käyn seuraavaksi läpi kolme samankaltaista HFT-mallia, joissa jokaisessa on arvioitu järjestelmän kokonaisviive. Pyrkimyksenä on ollut saavuttaa mahdollisimman tehokas järjestelmä ja kitkeä ylimääräinen viive pois.

Sadoghi ym. (2010) tutkivat erilaisten HFT-järjestelmien tehokkuutta mittaamalla erilaisten ratkaisujen kokonaisviivettä. He muodostivat HFT-kaupankäyntiä jäljittelevän testitilanteen ja generoivat järjestelmille markkinadataa edellisessä luvussa mainittuja TCP- ja FIX/FAST-protokollia käyttäen. Kokonaisviive laskettiin pakettien siirron ja järjestelmän päätöksenteon viiveen avulla. Tutkimuksessa verrattiin neljää erilaista ratkaisua, joiden pohjalla olivat:

- Soft Processor (FPGA-pohjainen)
- PC
- Hybridi
- FPGA

Soft Processor (FPGA-pohjainen) otettiin tutkimuksessa vertailuun helpon ohjelmoinnin ja käytettävyyden takia. Sen eduiksi laskettiin helppo käyttöönotto, syöteenluku sekä suhteellisen hyvä suorituskyky. FPGA-mikroprosessoriin pohjautuva ratkaisu oli kuitenkin suorituskyvyltään heikoin, ja alimmalla syötteellä kokonaisviive oli noin 71 mikrosekuntia.

Normaalilla tietokoneella (PC) saavutettiin ensimmäistä ratkaisua matalampi kokonaisviive. Suorittimena toimi Quad Xeon, jonka kellotaajuus oli 2,13GHz. Tällä ratkaisulla saavutettiin matalimmalla kuormituksella noin 54 mikrosekunnin kokonaisviive, joka on jo matalampi edelliseen Soft Processor ratkaisuun verrattuna.

Kolmas, FPGA-ToPSS hybridiratkaisu oli jo huomattavasti edellä mainittuja ratkaisuja nopeampi. Hybridimallilla viiveeksi saatiin alimmalla syötteellä noin kuusi mikrosekuntia. Tämän lisäksi ratkaisu on hyvin yleispätevä ja monipuolinen, jolloin se kykenee käsittelemään monipuolisempaa dataa, kuin esimerkiksi pelkkä FPGA-piiriin pohjautuva ratkaisu.

Suorituskyvylisesti paras tulos saavutettiin pelkkään FPGA-piiriin perustuvalla ratkaisulla, jossa kokonaisviiveeksi saatiin noin kolme mikrosekuntia. Toisaalta, edellä mainitun hybridimallin koettiin olevan pelkkiä FPGA-piirejä monipuolisempi ilman, että tehokkuus kärsi liikaa. Pelkkää suorituskykyä mittaessa kuitenkin pelkän FPGA-piirin käyttö laitteistotasolla sai aikaan tehokaimman lopputuloksen (ks. taulukko 1). Taulukossa 1 nähdään edellä mainittujen HFT-ratkaisujen kokonaisviiveet syöteen koosta riippuen.

TAULUKKO 1 Eri ratkaisuiden kokonaisviiveet mikrosekunteina (Sadoghi ym., 2010).

	PC	Soft-prosessori	Hybridi	Pelkkä FPGA
250	53,94	71,09	6,47	3,22
1K	60,77	199,43	7,56	-
10K	150	1617,85	87,82	-
100K	2001	16422,87	1307,3	-

Leberin ym. (2011) HFT-mallin tarkoituksena oli minimoida viive sekä optimoida laitteiston suorituskyky mahdollisimman hyvälle tasolle. He käyttivät mallissaan laitteistotasolla FPGA-piirejä, ja tiedonsiirto tapahtui UDP- ja FIX/FAST-protokollia käyttäen. Suorituskyky pyrittiin optimoimaan jokaisella tasolla ja paras suorituskyky saavutettiin ratkaisulla, jossa FAST-viestit syötettiin suoraan laitteistoon, josta ne puolestaan dekodattiin yhä eteenpäin. Eniten viivettä laski nimenomaan se, että datansyöttö saatiin tehtyä suoraan laitteistoon. Tällöin käyttöjärjestelmän ei tarvitse prosessoida käsiteltävää dataa, mikä ansiosta viive laskee huomattavasti. Ratkaisun kokonaisviiveeksi mitattiin noin 2,6 mikrosekuntia, joka on noin 0,4 mikrosekuntia vähemmän kuin Sadoghin ym. (2010) ratkaisussa. Erona Sadoghin ym. (2010) ratkaisuun voidaan mainita ainakin UDP:n käyttö tiedonsiirtoprotokollana TCP:n sijaan.

Lockwood ym. (2012) esittelivät jälleen FPGA-piireihin pohjautuvan ratkaisunsa, jonka avulla HFT-järjestelmän kokonaisviivettä pyrittiin laskemaan yhä enemmän. He esittelivät kirjaston, jonka avulla voidaan käsitellä osakemarkkinoilla käytettyjä protokollia FPGA-piirejä hyväksi käyttäen. Mallissa käsiteltiin eri osapuolilta (palvelin, pörssi, asiakas) tuleva data fyysisesti eri linkkien kautta ja tiedonsiirrossa käytettiin TCP-, UDP- ja FIX-protokollia. Laskenta tapahtui FPGA-piirin avulla. Heidän järjestelmällään saavutettiin stabiili, ainoastaan yhden mikrosekunnin kokonaisviive. Kokonaisviiveestä noin 0,4 mikrosekuntia kului tiedonsiirtoon kahdella eri fyysisellä tasolla ja loput 0,2 mikrosekuntia viestien prosessointiin ja protokollien parsimiseen.

HFT-järjestelmien tehokkuutta pyritään siis parantamaan, koska sillä saadaan etua muihin kaupankävijöihin, erityisesti HFT-yrityksiin nähden. Tutkimusten mukaan tehokkuudella on korrelaatiota taloudellisen tuoton kanssa. Koska teknologia on nykyään jo kehittynyttä ja tietokoneiden laskentateho on kasvanut, käytetään HFT-järjestelmissä FPGA-piirejä, jotka ovat osoittautuneet suorituskyvyltään ja monipuolisuudeltaan parhaiksi ratkaisuisiksi. Tehokkuudella pyritään vähentämään järjestelmän toiminnassa tapahtuvaa kokonaisviivettä. Tutkimusten mukaan HFT-järjestelmien kokonaisviive voidaan alentaa noin 1-3 mikrosekuntiin käyttämällä laitteistotasolla FPGA-piirejä ja ohjelmistotasolla UDP-, TCP- ja markkinaprotokollia.

3.2 Turvallisuus

Turvallisuuden määritelmä on moniulotteinen. Bishop (2003) määrittelee tietokoneiden turvallisuuden riippuvan vaatimuksista. Hänen mukaansa organisaatio itse määrittelee turvallisuuteen liittyvät vaatimukset, joiden täyttyessä tiedon voidaan ajatella olevan turvassa. Turvallisuutta voidaan täten lisätä organisaation omilla mekanismeilla, esimerkiksi käyttöoikeuksien määrittelyllä (Bishop, 2003). Tässä tutkielmassa HFT-järjestelmien turvallisuudella tarkoitetaan suojautumista erilaisilta HFT-järjestelmään kohdistuvilta tietoturvauhilta. HFT-kaupankäynnin tietoturvauhka voisi olla tilanne, jossa asiaankuulumaton henkilö pääsisi käsiksi esimerkiksi myynti- tai ostotoimeksiantoihin. Vaikka tietoturva onkin suosittu puheenaihe nykyään, ei HFT-aiheisissa julkaisuissa juurikaan puhuta tietoturvasta tai mahdollisista tietoturvauhkien aiheuttamista vaikutuksista. On siis syytä pohtia kohdistuuko HFT-järjestelmiin tietoturvauhkia. Tutkimusten mukaan ainakin TCP- ja UCP-protokollien käyttöön liittyy joitakin uhkia.

Aldridge (2013) sanoo, että HFT-järjestelmien turvallisuusaukot voisivat jopa tuhota markkinat ja aiheuttaa suuria tappioita kaikille markkinaosapuolille. Hänen mukaansa tietoturvauhat kasvavat erityisesti verkossa, jossa data kulkee peer-to-peer -mallin mukaisesti eli toisten verkonkäyttäjien läpi, jolloin data voidaan kaapata ulkopuolisten toimesta. Ajatukselle saadaan tukea tutkimalla itse protokollien tietoturvaa. Muun muassa TCP/IP-paketit voidaan kaapata ja niitä voidaan manipuloida (Harris & Hunt, 1999). Myös tässä tapauksessa tietoturvariskin esitetään korostuvan silloin, kun data kulkee suoraan hyökkääjän kautta. Vaikka HFT-kaupankäynnissä käytettävien pakettien kaappaaminen onkin mahdollista, Aldridgen (2013) esittämä skenaario markkinatuhosta vaikuttaa hieman liioitellulta. Ensinnäkin, volyymin tulisi olla suurta jos kokonainen markkina haluttaisiin lamauttaa. Tällaisen volyymin saavuttaminen pelkääntään muiden toimijoiden paketteja manipuloiden kuulostaa absurdilta. Toki yksittäisten pakettien manipuloiminen voi aiheuttaa suuria tappioita itse hyökkäyksen kohteena olevalle yritykselle. Voisi siis kuvitella, että HFT-yritykset haluavat pitää tietoturvansa hyvällä tasolla.

HFT-järjestelmien viestinnän turvallisuutta voidaan parantaa käyttämällä salausta. HFT-järjestelmissä käytettävät TCP/IP ja UDP-protokollat eivät käytä salausta tiedonsiirrossa, mutta edellä mainitussa FIX-protokollassa voidaan käyttää salausta ilman, että tehokkuus kärsii suunnattomasti (Aldridge, 2013). FIX-viestin salauksella voidaan taata se, että asiaankuulumattomat toimijat eivät pysty lukemaan viestin sisältöä. Viestin salaaminen ei kuitenkaan välttämättä ole tarpeellista. HFT-järjestelmät nimittäin sijoitetaan myös fyysisesti jopa samaan rakennukseen markkinoiden palvelimien kanssa (Aldridge, 2013; Leber, 2011). Tällöin saavutetaan turvallinen ja suora tiedonsiirto kaupankävijöiden ja pörssin välillä, jolloin paketteja on vaikeampi kaapata verrattuna esimerkiksi siihen, että tieto kulkisi verkon solmukohtien läpi ympäri maailmaa (Aldridge, 2013). Kun markkinoiden palvelin käyttää samaa verkkoa HFT-yritysten kanssa,

on epätodennäköistä, että data joutuisi hyökkäyksen kohteeksi talon sisältä. Samalla myös tiedonsiirrosta johtuva etenemisviive saadaan minimoitua, jolloin aiemmassa luvussa mainittu tehokkuus paranee (Aldridge, 2013; Leber, 2011).

HFT-järjestelmiin liittyvissä julkaisuissa käsitellään melko vähän turvallisuutta. Yleisesti ottaen turvallisuuteen toki halutaan panostaa. On kuitenkin epäselvää, liittyykö HFT-järjestelmien toimintaan mahdollisia turvallisuusuhkia ja jos liittyy, mitä seurauksia niillä voi olla. Voidaan kuitenkin todeta, että HFT-järjestelmien teknisiin ratkaisuihin, esimerkiksi protokollisiin liittyy joitakin turvallisuusuhkia. Yksittäiselle yritykselle nämä tietoturva-aukot voisivat mahdollisesti aiheuttaa tappioita. Käytännössä tämä riski on kuitenkin pieni, koska HFT-järjestelmät sijoitetaan useimmiten samaan rakennukseen markkinoiden palvelimien kanssa. Tällöin on epätodennäköistä, että verkossa olisi mahdollinen hyökkääjä. Voidaan siis todeta, että HFT-järjestelmiin liittyy teoreettisesti joitakin turvallisuusriskejä, mutta käytännössä näiden riskien toteutumisen todennäköisyys on pieni.

3.3 Riskienhallinta

Monissa tutkimuksissa on yritetty selvittää HFT-kaupankäynnin vaikutusta markkinoihin. Osa ihmisistä on sitä mieltä, että HFT voi aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia markkinoihin. Spekulaatiivisesti ajateltuna tällaisia negatiivisia vaikutuksia voisi olla esimerkiksi markkinoiden tehottomuus, korkea volatiliteetti tai epävakaus. Toki voidaan ajatella, että väärin toimiva HFT-järjestelmä saattaa lisätä markkinoiden epävarmuutta. Tällöin kuitenkin myös HFT-kaupankävijä kärsisi tappioita, minkä vuoksi HFT-järjestelmien toiminnan halutaan olevan hyvin hallinnassa. Tässä alaluvussa käsitellään HFT-järjestelmien aiheuttamia mahdollisia riskitekijöitä sekä näiden myötä vaadittua riskienhallintaa.

Jarrow ja Protter (2012) tutkivat HFT-kaupankäynnin aiheuttamia mahdollisia häiriötekijöitä muihin sijoittajiin (ei HFT) nähden. Tutkimuksessa käsiteltiin erityisesti HFT-kaupankäynnin arbitraasiin pohjautuvia strategioita ja niiden vaikutuksia normaalien osakesijoittajien mahdollisuuksiin. Oletuksena oli, että arbitraasistrategiaa käyttävä HFT-sijoittaja korjaa markkinoilla olevan arbitraasitilanteen eli hinnoitteluvirheen heti. Tällöin normaalit osakesijoittajat eivät ehdi havaita arbitraasia. Tutkimuksen pääajatuksena olikin, että HFT-kaupankävijät tekevät voittoa muiden sijoittajien kustannuksella ja että markkinat eivät täten toimi tehokkaasti. Heidän mielestään HFT-kaupankäyntiä pitäisi rajoittaa sääntelyillä. Omasta mielestäni kyseisessä tutkimuksessa on kuitenkin tehty liikaa oletuksia ja muun muassa ajateltu, että normaalit sijoittajat ja HFT-kaupankävijät olisivat jollakin tavalla vastakkain osakemarkkinoilla. Angel ja McCabe (2013) tutkivatkin tähän liittyen sitä, onko HFT-kaupankäynti "reilua" muita markkinatoimijoita kohtaan. Reiluus finanssimarkkinoilla määritellään muun muassa siten, että kaikilla markkinatoimijoilla on käytettävissään yhtäläiset tiedot yrityksen tilasta. Pörssiyrityksen sisäpiiriä

velvoitetaan tuomaan julki tieto yrityksen tilasta, mikä kasvattaa läpinäkyvyyttä ja sitä myötä parantaa markkinoiden tehokkuutta. (Shefrin & Statman, 1992.) Angel ja McCabe (2013) totesivat, että HFT-järjestelmien nopeus itsessään ei tee kaupankäynnistä epäreilua muita sijoittajia kohtaan, koska kaikilla markkina-toimijoilla on joka tapauksessa yhtäläiset tiedot käytössään. He totesivat myös, että normaalit pidemmän aikavälin sijoittajat eivät edes yritä hyötyä arbitraasitilanteista, kuten HFT-sijoittajat. Tällöin Jarrowin ja Protterin (2011) yllä mainittu vastakkainasettelu HFT- ja normaalien sijoittajien välillä vaikuttaa absurdilta. Voidaan siis todeta, että HFT-kaupankäynnin aiheuttamia todistettuja negatiivisia markkinavaikutuksia ei ole ja että HFT-kaupankävijät eivät kilpaile normaaleja sijoittajia vastaan.

Suurin osa tutkimuksista osoittaaakin, että HFT:llä on enimmäkseen positiivisia vaikutuksia markkinoiden toimintaan. Nämä tutkimukset kumoavat harvat, edellä mainitut esimerkit HFT-kaupankäynnin negatiivisista vaikutuksista. Brogaard (2010) tutki kahdeksaa HFT-kaupankäyntiin liittyvää hypoteesiä. Hän analysoi muun muassa markkinadataa ja tutki HFT-kaupankäynnin kannattavuutta, suhdetta muuhun markkinaan, likviditeettiä, hintojen muodostumista sekä volatilitteettiä. Mikään ei viitannut HFT-kaupankäynnin vaikuttavan negatiivisesti markkinoiden toimintaan tai muihin kaupankävijöihin. Tutkimuksen mukaan HFT voi itse asiassa jopa vähentää volatilitteettiä ja sitä myötä stabilisoida markkinoita.

Vuoden 2010 hetkellisen S&P 500 -indeksin futuurien pörssiromahduksen eli niin sanotun Flash Crash:n aiheuttajaksi on monissa yhteyksissä epäilty HFT-kaupankäyntiä. Kirilenko ym. (2015) tutkivat E-mini S&P 500 futuurien kaupankäyntiä romahduksen ajankohtana ja sitä edeltävinä päivinä. Tutkimus perustui dataan, jota käsiteltiin sekuntitarkkuudella kyseisinä päivinä. Kirilenko ym. (2015) löysivät tiettyjä lainalaisuuksia HFT-kaupankäynnin strategioiden toiminnan ja markkinahintojen välillä. Nämä lainalaisuudet säilyivät voimassa myös Flash Crash -pörssiromahduksen aikana, minkä vuoksi itse HFT-kaupankäyntiä ei voida syyttää pörssiromahduksesta. Menkveld ja Yueshen (2015) puolestaan tutkivat Flash Crash:n aikana tapahtuneita E-mini -futuurien myyntejä sekä SPY-optioiden suhdetta. Heidän arvionsa mukaan yksittäinen kaupankävijä pyrki tekemään voittoa E-minien ja SPY:n välisellä markkina-arbitraasilla. Kun arbitraasitilanne poistui, joutui kaupankävijä hidastamaan futuurien myyntiään, mikä aiheutti romahduksen. Tutkimuksen mukaan siis yksittäisen HFT-kaupankävijän arbitraasitilanne muodostui lopulta itselleen epäedulliseksi. Tutkimuksessa arvioitiin, että kyseisen HFT-kaupankävijän kaupankäyntialgoritmi ei välttämättä toiminut optimaalisella tavalla. Algoritmi näytti toimivan normaalien markkinaolosuhteiden mukaan eikä sitä muutettu markkinatilanteen muutokseen vaaditulla tavalla (Menkveld & Yueshen, 2015).

Tutkimusten mukaan siis HFT-kaupankäynti itsessään ei ole riski markkinoille ja edellä mainittuun Flash Crash -pörssiromahdukseen liittyvät teoriat pohjautuvatkin HFT-kaupankäynnin strategioiden toimivuuteen. On syytä muistaa, että HFT-yritykset tekevät tappiota, mikäli heidän kaupankäyntistrategiansa eivät toimi halutulla tavalla. Tämä itse asiassa onkin eräs syy, miksi

riskienhallintaa tehdään (Aldridge, 2013; Cartea & Jaimungal, 2015). Riskienhallinta siis vähentää yrityksen omia mahdollisia tappioita ja sitä myötä myös markkinoihin kohdistuva riski vähenee.

Aldridge (2013) määrittelee useita eri riskityyppejä, joita HFT-kaupankäyntiin voi liittyä. Tässä tutkielmassa riskeillä tarkoitetaan kaupankäynnin tilanteita, joissa HFT-järjestelmä ei toimi halutulla tavalla ja tuottaa esimerkiksi tappiota. Tappioiden välttämiseksi kaupankäynnissä pyritään minimoimaan riskit (Aldridge, 2013; Cartea & Jaimungal, 2015). Aldridgen (2013) mukaan HFT-kaupankäynnin riskienhallinta voidaan jakaa neljään eri aspektiin, joita ovat

- tappioiden minimointi,
- volatiliteetin arviointi,
- value-at-risk (VaR) ja
- hedging eli sijoitusten suojaaminen

Tappiot pyritään minimoimaan optimaalisilla hinnan raja-arvolla, jolla esimerkiksi ostettu arvopaperi myydään. Tällöin algoritmin toiminta pyritään saamaan markkinoille optimaaliseksi ottaen huomioon omat positiot arvopapereissa. Optimaalinen raja-arvo voidaan määrittää matemaattisesti todennäköisyyslaskennan avulla. (Aldridge, 2013.) Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä optimoinnin matemaattista mallia. Yllä mainitussa Menkveldin ja Yushenin (2015) tutkimuksessa juurikin algoritmin optimoinnin arveltiin olevan pielessä Flash Crash -pörssiromahduksessa. Tappioiden minimoinnin ideana on siis se, että siinä pyritään löytämään optimaalinen hinnan raja-arvo, jossa arvopaperista luovutaan. Tällöin HFT-kaupankävijän positio voi olla joko voitollinen tai tappiollinen. Tappiolla olevasta arvopaperista voidaan esimerkiksi luopua ennen kuin tappiot kasvavat suuriksi.

Volatiliteetin arvioinnissa nimensä mukaisesti arvioidaan markkinoiden volatiliteettiä ja sitä kautta etsitään optimaalisia kaupankäyntiolosuhteita strategiasta riippuen. Jotkut HFT-kaupankäyntistrategiat toimivat paremmin volatiliteetin ollessa korkea – toiset taas volatiliteetin ollessa alhainen. (Aldridge, 2013.) Volatiliteettiä voidaan arvioida eri tavoilla ja useat tekijät vaikuttavat volatiliteettiin. Poterba ja Summers (1984) tutkivat volatiliteetin vaikutusta osakkeiden markkinahintoihin. He esittivät, että volatiliteetti ei korreloi osakkeiden hintojen kanssa, koska suuret volatiliteetin muutokset ovat väliaikaisia. Schwert (1989) tutki volatiliteetin käyttäytymistä eri aikajaksoina ja sen kehittymistä ajan mittaan. Tutkimuksen mukaan makrotalouden tilanne vaikuttaa jonkin verran osakkeiden volatiliteettiin. Volatiliteetti vaihtelee siis tilanteesta riippuen, jolloin sitä on vaikea arvioida pelkän menneisyyden perusteella. Aldridge (2013) mainitseekin, että volatiliteetin arviointi pelkästään menneisyyden avulla sisältää riskejä, koska volatiliteetti voi vaihdella menneisyydestä riippumatta. Aldridgen (2013) mukaan volatiliteettia voidaan arvioida esimerkiksi VIX-indeksin avulla. Hän esittää myös kolme matemaattista mallia volatiliteetin määrittämiseen, joita ei käsitellä tässä tutkielmassa. On kuitenkin syytä

tiedostaa, että riskienhallinnassa on määriteltävä ”pahin mahdollinen” tappio, joka otetaan huomioon kun arvioidaan HFT-kaupankäyntistrategialle optimaalista volatiliteettiä (Aldridge, 2013).

Value-at-risk (VaR) on yleinen mittari riskin arviointiin, jota käytetään soveltaen riskienhallinnassa monella eri alalla (Bodnar, Hayt & Marston, 1998). Basak ja Shapiro (2001) määrittelevät VaR:n kuvaavan tappiota, joka voi tapahtua tietyllä todennäköisyydellä olemassa olevan markkinariskin vuoksi. Aldridge (2013) sanoo, että HFT-kaupankäynnin riskienhallinnassa VaR:a käytetään markkinavaikutuksen ylärajan sekä tappioiden pohjan asettamiseen ja että HFT-strategiaa voidaan arvioida näiden avulla tarpeen vaatiessa. Ideana on se, että tietyistä kaupankäyntiotoksesta voidaan laskea mahdolliset tappiot ja niiden todennäköisyys. Jos huomataan, että strategia ylittää VaR:n avulla määritetyt riskirajat, voidaan strategiaa muuttaa tarvittavalla tavalla (Aldridge, 2013).

Hedging tarkoittaa sijoitusten suojaamista muilla sijoituksilla. Johnsonin (1960) esimerkin mukaan sijoittaja ostaa hyödykkeen tietyllä hinnalla ja haluaa vähentää tuotteen mahdollisesta arvosta laskusta johtuvaa riskiä. Tällöin hän voi vähentää ostosta johtuvaa riskiä myymällä sopivan määrän kyseisen hyödykkeen futuureita. Aldridgen (2013) mukaan myös HFT-kaupankäynnissä käytetään sijoitusten suojaamista. Suojaamista voidaan tehdä yksittäiselle arvopaperille tai koko portfoliolle eli useammille arvopapereille. Portfolion suojaukseen on kehitetty erilaisia algoritmeja, jotka voivat olla hyvinkin monimutkaisia. (Aldridge, 2013.) Tässä tutkielmassa ei kuitenkaan käsitellä niitä tarkemmin.

Edellä mainittujen riskienhallintamenetelmien todistamista tai matemaattikkaa ei käsitellä tässä tutkielmassa. On kuitenkin syytä tiedostaa millaisia riskejä HFT-kaupankäyntiin liittyy ja millä tavoin näitä riskejä kontrolloidaan. Yhteenvetona voidaan todeta, että HFT-kaupankäynnissä hallitaan riskejä useilla eri tavoilla. Tappiot pyritään minimoimaan määrittämällä toimeksiannoille hintojen raja-arvot. Volatiliteettiä arvioidaan, jotta HFT-kaupankäyntistrategiaa voidaan käyttää mahdollisimman optimaalisessa markkinatilanteessa. Riskin arvioimiseen käytetään VaR:a, jonka avulla HFT-kaupankäyntistrategiaa voidaan muuttaa tarpeen vaatiessa. Sijoituksia suojataan muilla sijoituksilla, jolloin kokonaisriski pienenee. HFT-järjestelmien riskienhallintaa tehdään siis tappioiden minimoimiseksi, jolloin myös markkinoihin kohdistuva epävakaisuuden riski pienenee.

4 HFT-JÄRJESTELMIEN TOIMINNAN TEHOSTAMINEN

Aiemmissa luvuissa on esitelty HFT-järjestelmät teknisten ja toiminnallisten ratkaisuiden näkökulmasta. Tässä luvussa käsitellään HFT-järjestelmien toiminnan tehostamista. Aiemmat luvut ovat pohjana tämän luvun analyysille. Tehostamismenetelmät eivät ole viitekehykseen pohjautuvia, vaan kirjallisuudesta löytyneitä menetelmiä, joita esiintyi useimmissa julkaisuissa. Ne eivät poissulje muita tapoja tehostaa HFT-järjestelmien toimintaa. Kuten edellisessä pääluvussa mainittiin, tehokkuudella tarkoitetaan HFT-järjestelmän nopeutta toimia erilaisissa tilanteissa. HFT-järjestelmän tehokkuutta voidaan parantaa laitteisto- ja ohjelmistovalinnoilla sekä sijoittamalla HFT-järjestelmät fyysisesti lähelle markkinapaikkaa. Tässä tutkielmassa perusoletuksena on se, että tehokkuutta parantamalla HFT-järjestelmän toiminta tehostuu myös taloudellisesta näkökulmasta, jolloin HFT-kaupankäynti on kannattavampaa (Brogaard ym., 2016).

4.1 Laitteistovalinnat

Laitteisto vaikuttaa paljon HFT-järjestelmän laskentakykyyn ja sitä kautta tehokkuuteen. HFT-järjestelmän toimintaa tehostettaessa halutaan maksimoida järjestelmän tehokkuus ja sitä kautta taloudellinen tuotto. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että laskentakyvyltään tehokkaampi laitteisto takaa paremman HFT-kaupankäynnin tuoton (Brogaard ym., 2016).

Luvussa kaksi esiteltyt FPGA-piirit todettiin tehokkaiksi laskentakyvyltään, minkä vuoksi ne sopivat tehokkuutta vaativien HFT-järjestelmien laitteistoksi. Myös FPGA-piirien helpohko implementointi puoltaa niiden käyttöä HFT-järjestelmissä. Laskentakyvyltään FPGA-piirit ovat selvästi perinteisiä suorittimia (CPU) tehokkaampia. Lockwood ym. (2012) saavuttivat implementoinnillaan ainoastaan yhden mikrosekunnin kokonaisviiveen käyttämällä FPGA-pohjaista järjestelmäratkaisua. Vaikka FPGA-piirien valmistaminen on-

kin hitaampaa ja kalliimpaa kuin normaalien suorittimien, kannattaa niitä käyttää HFT-järjestelmissä pitkän aikavälin tuottoa ajatellen (Lockwood ym., 2012). Tällä hetkellä FPGA-piirien käytölle HFT-järjestelmissä ei juurikaan löydy haittapuolia.

Lockwoodin ym. (2012) saavuttama yhden mikrosekunnin kokonaisviive vaikuttaa jo erittäin alhaiselta. On kuitenkin syytä pohtia, voidaanko HFT-järjestelmien laskentakykyä yhä parantaa laitteiston avulla. Gomez-Pulido ym. (2011) totesivat, että GPU-piirien tehokkuus on liki sama kuin FPGA-piireillä syötteen kasvaessa tarpeeksi suureksi. Saman tutkimuksen mukaan tietyissä tapauksissa GPU-piirien laskentakyky oli jopa tehokkaampi kuin FPGA-piireillä. Preis (2011) tutki GPU-piirien soveltamista finanssidatan käsittelemiseen eri metodeilla. Tutkimuksessaan hän mainitseekin olennaiseksi käyttökohteeksi HFT-kaupankäynnin. Hän testasi GPU-piirien suorituskykyä erilaisilla laskutoimenpiteillä ja vertasi niitä normaaleihin suorittimiin (CPU). Tutkimuksen metodeja sovellettiin EUREX-pörssin dataan ja siinä käsiteltiin German Bund -futuureja. Kävi ilmi, että GPU-piirien laskentakyky kyseisillä metodeilla on huomattavasti suorittimia parempi. Preis (2011) totesi GPU-piirien olevan noin 15–80 kertaa nopeampia suorittimiin verrattuna. Lopputulos riippui metodista ja laskentatoimenpiteistä. GPU-piirien hyvä laskentateho ei sinänsä ole yllättävää, koska samanlaisia tuloksia nähtiin jo luvussa 2, jossa esiteltiin eri komponenttien suorituskykyeroja (kuvio 2). Preisin (2011) tutkimus kuitenkin käsitteli itse finanssidataa ja GPU-piirien soveltamista erityisesti HFT-kaupankäyntiin. GPU-piirien soveltaminen HFT-kaupankäyntiin voisi siis hyvinkin olla mahdollista - julkaisuja käytännön implementoinneista ei kuitenkaan löydy toisin kuin esimerkiksi FPGA-ratkaisuista.

Huolimatta siitä, että suoraa näyttöä GPU-piirien käytöstä HFT-kaupankäynnissä ei löydy, on GPU-piirit otettu jo käyttöön finanssialalla. Tämän toteavat Hong, Zhong-hua ja Xue-bin (2010) julkaisussaan, jossa käsiteltiin tehokkaiden teknologioiden käyttöä finanssialalla. Heidän mukaansa GPU-piirien käyttö on yleistynyt FPGA-piirien lisäksi esimerkiksi pörssianalyytikoiden keskuudessa. Erään mahdollisen käyttökohteen esittävät Dixon, Chong ja Keutzer (2009). He simuloivat luvussa kolme esitetyn HFT-kaupankäynnin riskienhallintamenetelmän VaR:n arviointia. Mallissa käytettiin NVIDIA GeForce GTX280 -grafiikkakorttiin (GPU) pohjautuvaa ratkaisua, jota verrattiin Intel Core2 Q9300 -suorittimeen (CPU). Lopputulos oli selvä: GPU-implementoinnin nopeus oli 148 kertaa parempi CPU-ratkaisuun verrattuna. GPU-piirejä siis voidaan käyttää finanssialalla eri käyttötarkoituksiin. Jatkoa ajatellen olisi syytä tutkia, millä tavoin GPU-piirejä voitaisiin soveltaa itse HFT-kaupankäyntiin ja onko näillä ratkaisuilla mahdollista kilpailla jo tämän hetkisten FPGA-piireihin pohjautuvien ratkaisuiden kanssa. Tällä hetkellä voidaan kuitenkin todeta, että HFT-järjestelmien jo saavutettu yhden mikrosekunnin kokonaisviive on todella alhainen, jolloin laitteiston avulla ei välttämättä voida enää parantaa HFT-järjestelmien toimintaa. Teknologian kehitys tulee olemaan merkittävässä roolissa tämän asian jatkoa ajatellen.

4.2 Ohjelmistovalinnat

Laitteiston lisäksi myös HFT-järjestelmän ohjelmisto vaikuttaa järjestelmän suorituskykyyn. Luvussa kaksi esiteltiin yleisimmät HFT-järjestelmissä käytettävät protokollat. Todettiin, että HFT-järjestelmien tiedonsiirrossa käytetään TCP-, UDP- ja FIX-protokollia. Käytettävä protokolla riippuu siitä, kuinka luotettavaa ja toisaalta tehokasta tiedonsiirron halutaan olevan.

Luotettavaa TCP-protokollaa todettiin käytettävän silloin, kun tiedon halutaan pääsevän perille, eikä pakettien katoamista voida sallia. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi pörssikaupankäynnin myynti- ja ostotoimeksiannot. TCP-protokollan todettiin kuitenkin olevan melko hidas erityisesti WAN-verkoissa pakettien ruuhkautumisen vuoksi. HFT-kaupankäynti ei kuitenkaan tapahdu WAN-verkoissa, koska HFT-järjestelmät sijoitetaan samaan verkkoon pörssin palvelimien kanssa (Aldridge, 2013; Leber, 2011). Koska ”turhaa” TCP-protokollan käyttöä pyritään jo välttämään, on vaikea löytää TCP-protokollan käytölle korvaajaa. Sen avulla saadaan varmasti kuljetettua data vastaanottajalle, jolloin kriittinen tieto pääsee perille.

Nopeaa perusprotokollaa UDP:tä käytetään HFT-järjestelmissä markkinatiedon välittämiseen (Lockwood ym., 2012). Koska UDP-protokollassa ei taata tiedonsiirtoa on se nopeampi ja tehokkaampi kuin TCP-protokolla. Tämän vuoksi UDP-protokollaa todettiin käytettävän ei-kriittisessä, mutta toisaalta nopeutta vaativassa tiedonsiirrossa. Teoreettisesti ajateltuna HFT-järjestelmän tehokkuus voitaisiin maksimoida täysin käyttämällä UDP-protokollaa kaikkeen tiedonsiirtoon. Tämä ei kuitenkaan ole käytännössä mielekäs – jos myynti- tai ostotoimeksianto ei edes pääsisi perille, niin edes järjestelmän tehokkuudesta ei ole mitään hyötyä. UDP-protokollaa kannattaa siis käyttää HFT-järjestelmissä mahdollisimman paljon toimenpiteissä, jossa se ei vaaranna järjestelmän toimivuutta.

FIX-protokollan todettiin toimivan viestinnän alimmalla tasolla tarkoittaen sitä, että FIX-viestit kuljetetaan yllä mainittujen TCP- ja UDP-protokollien avulla (Aldridge, 2013; Leber, Geib & Litz, 2011). FIX-itsessään on yleisesti pörssikaupankäynnissä käytetty protokolla. FIX-viestit sisältävät tietoa toimeksiannoista ja markkinadatasta ja ne pohjautuvat XML:ään. Luvussa 2 esiteltiin FIX-viesti, josta nähdään että se on hyvin yksinkertainen eikä sisällä mitään ylimääräistä tietoa. FIX-protokollaa ei itsessään voida tehostaa, mutta se voidaan korvata jollain vastaavalla protokollalla jos halutaan parantaa tehokkuutta. Luvussa 2 mainittiin FAST-protokolla, joka on nopeampi kuin FIX. Jos tehokkuus halutaan maksimoida, kannattanee käyttää tiedonsiirrossa FAST-protokollaa. Edellä mainittujen protokollien suorituskykyeroista ei kuitenkaan löydy tutkimuksia. Tiedonsiirrossa voidaan käyttää myös muitakin markkinaprotokollia pörssistä riippuen, mutta FIX-protokollaa käytetään selvästi eniten.

HFT-kaupankävijä voi toki vaikuttaa omissa järjestelmissään käytettyyn ohjelmointikieleen ja algoritmien toteutukseen. Edellä mainittua FIX-

protokollaa voidaan käyttää monien eri jo olemassa olevien kirjastojen avulla. Tästä esimerkkinä on avoimeen lähdekoodiin ja C++:aan perustuva QuickFIX-kirjasto. Kirjastoa voidaan käyttää myös muilla ohjelmointikielillä kuten Javalla, C#:lla, Pythonilla tai Rubylla. (QuickFIX, 2014.) Näitä kieliä ei kuitenkaan voi syöttää suoraan FPGA-piiriin, joten niitä voidaan käyttää ainoastaan perinteisissä PC-pohjaisessa HFT-ratkaisussa. Sen vuoksi tehokkuutta maksimoidessa nämä avoimen lähdekoodin kirjastot eivät ole parhaita ratkaisuja. Kaupankäyntialgoritmien toteutukseen ei perehdytä tässä tutkielmassa.

4.3 Laitteiston fyysinen sijainti

Fyysisen sijainnin vaikutusta tuottoon on tutkittu jo ennen HFT-kaupankäynnin yleistymistä. Lyhyt etäisyys suhteessa markkinapaikkaan nopeuttaa tiedonkulkua. Tällöin osapuolet, jotka saavat markkinainformaatiota ennen muita, ovat luonnollisesti paremmassa asemassa muihin verrattuna. Fyysisen sijainnin merkitys korostuu erityisesti HFT-kaupankäynnissä, mutta sillä on merkitystä myös perinteisemmässä kaupankäynnissä. Esimerkiksi Hau (2001) toteaa, että fyysinen sijainti ja sitä myötä tiedonsiirron nopeus vaikuttaa erityisesti nopeammassa kaupankäynnissä tuottoihin. Hänen tutkimuksessaan käsiteltiin eurooppalaisia sijoittajia, jotka kävivät kauppaa Frankfurtin pörssin arvopapereilla. Kaupankävijät sijaitsivat hajallaan ympäri Eurooppaa. Tutkimuksessa havaittiin, että pörssiä lähempänä olleet sijoittajat saivat muita parempia tuottoja. Tämä korostui erityisesti silloin kun kaupankäynnin nopeus kasvoi.

HFT-kaupankäynnissä laitteisto sijoitetaan usein aivan markkinapaikan läheisyyteen. Luvussa 3 todettiin, että HFT-järjestelmiä voidaan käyttää myös samassa verkossa markkinoiden palvelimien kanssa (Aldridge, 2013; Leber, 2011). Tällöin saavutetaan turvallinen tiedonsiirto ja samalla tiedonsiirrosta johtuva etenemisviive on alhainen. Mielenkiintoinen kysymys on, kuinka paljon tiedonsiirron viive voi vaikuttaa HFT-järjestelmän tehokkuuteen. Baronin ym. (2016) tutkimuksessa viive-ero nopeimpien ja hitaimpien HFT-sijoittajien välillä oli joitakin millisekunteja toimijoista riippuen. Heidän tutkimuksensa mukaan siis nopeimmat HFT-toimijat saivat eniten tuottoja muihin verrattuna. Etu voidaan siis saavuttaa jo millisekuntien avulla.

Aldridge (2013) kuvaa hyvin tiedonsiirrosta johtuvaa viivettä eri markkinapaikkojen välillä (ks. taulukko 2). Taulukosta 2 nähdään etäisyydestä muodostuva viive millisekunteina tiedon kulkiessa markkinapaikasta toiseen (Aldridge, 2013). Taulukosta havaitaan, että tiedonsiirron viive kasvaa oleellisesti etäisyyden kasvaessa. Jos millisekunnitkin ovat jo ratkaisevassa osassa tuottoa maksimoidessa, niin HFT-järjestelmien sijoittaminen fyysisesti lähelle pörssiä vaikuttaa todella kannattavalta. Tiedonsiirto laajan verkon yli ympäri maailmaa kasvattaa viivettä kymmeneen tai jopa satoihin millisekunteihin (ks. taulukko 2). Sen lisäksi se on alttiimpi tietoturvahille, kuten luvussa 3 mainittiin. Laitteiston fyysinen sijainti suhteessa markkinapaikkaan vaikuttaa siis paljon

HFT-järjestelmän tehokkuuteen, minkä vuoksi laitteisto kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle markkinapaikkaa.

TAULUKKO 2 Etäisyyden vaikutus viiveeseen (Aldridge, 2013, 31).

	New York, NY	Washington, DC	Toronto, Canada	Chicago, IL	London, U.K.	Frankfurt, Germany	Sao Paolo, Brazil	Tokyo, Japan
Newark, NJ	0.314	3.400	9.470	15.175	65.763	74.383	109.414	141.640
New York, NY		4.057	9.784	15.291	65.533	74.153	109.100	141.756
Washington, DC			13.270	14.175	69.083	78.164	111.960	140.640
Toronto, ON				10.795	75.233	83.853	118.884	136.910
Chicago, IL					80.740	89.360	123.485	127.595
London, U.K.						8.620	183.253	215.825
Frankfurt, Germany							183.253	215.825
Sao Paolo, Brazil								249.950

4.4 Strategiiriippuvaisuus

Kuten tässä ja muissakin HFT-kaupankäyntiin liittyvissä tutkimuksissa, HFT-järjestelmän tehokkuuden on todettu vaikuttavan kaupankäynnin taloudelliseen tuottoon. Baron ym. (2016) totesivat, että nopealla HFT-järjestelmällä kaupankävijä saavuttaa etua hitaampiin kaupankävijöihin nähden muun muassa havaitsemalla muita useammin edullisia kaupankäyntipositioita, jolloin taloudellinen tuottokin on korkeampi. Tämän edun nähtiin korostuvan erityisesti Market making- ja arbitraasistrategioissa. On siis syytä tarkastella HFT-järjestelmän tehokkuuden ja eri kaupankäyntistrategioiden suhdetta, koska ei ole selvää, kasvattaako tehokkuuden maksimointi kaupankäynnin menestystä strategiasta riippumatta.

Luvussa 2 esiteltiin neljä HFT-kaupankäynnin yleisintä strategiaa: arbitraasi, tapahtumiin perustuva kaupankäynti, Market making ja likviditeetin tarkkailu. Näistä kolme ensimmäistä ovat eniten tutkittuja ja parhaiten selitettäviä strategioita toiminnaltaan. *Arbitraasi* pohjautuu niin sanottuihin hinnoitteluvirheisiin arvopapereiden tai eri markkinoiden välillä, jolloin kaupankävijä voi tilanteen havaitessaan saada riskitöntä tuottoa. Arbitraasitilanne poistuu markkinoilta nopeasti. *Tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä* kaupankävijä reagoi esimerkiksi uutisiin taikka julkistuksiin ja pyrkii ennakoimaan markkinoiden reaktion ennen muita. Tällöin hän voi esimerkiksi ostaa tiettyä arvopaperia ennen kuin valtaosa markkinoista on ehtinyt reagoida tässä tapauksessa positiiviseen uutiseen, joka nostaa arvopaperin hintaa. *Market making* perustuu likviditeetin tarjoamiseen markkinoille. Strategiassa pyritään tekemään voittoa marginaalisella hintaedulla.

Baron ym. (2016) totesivat, että HFT-järjestelmän nopeuden merkitys korostuu erityisesti esimerkiksi arbitraasistrategiassa. Samassa tutkimuksessa todettiin, että nopeilla HFT-järjestelmillä havaitaan muita useammin edullisia kaupankäyntipositioita, jolloin myös tuotot ovat parempia. Tämän voidaan ajatella korostuvan erityisesti arbitraasistrategioissa: kun markkinoilta löydetään arbitraasitilanne, kaupankävijät haluavat tehdä sillä voittoa heti. Tällöin arbitraasitilanne myös poistuu markkinoilta. Tätä voidaan havainnollistaa esimerkiksi. Markkinoilla A myydään banaaneja hintaan 20 senttiä kappale ja markkinoilla B halutaan ostaa banaaneja hintaan 25 senttiä kappale. Arbitraasin havaitseva kaupankävijä käy ostamassa banaanit halvemmilta markkinoilta ja myy pois toisessa paikassa. Tällöin arbitraasitilanne poistuu ja nopea kaupankävijä on tehnyt voittoa. HFT-kaupankäynnissä banaanien sijaan käydään kauppaa arvopapereilla. Voidaan siis todeta, että arbitraasistrategioissa HFT-järjestelmän nopeuden merkitys on suuri, koska kaupankävijä kilpailee muiden nopeiden kaupankävijöiden kanssa.

Tiedetään, että uutiset yleisesti vaikuttavat osakemarkkinoiden hinnoitteluun. Uutisiin reagoivat HFT-sijoittajien lisäksi myös tavalliset pitkän aikavälin sijoittajat. Markkinoilla lyhyen aikaa olleesta tiedosta eniten etua saavat ne, jotka saavat tiedon ennen muita. Tällöin he voivat reagoida tietoon tavalla, joka muuttuu edulliseksi tiedon levitessä. Luonnollisesti myös tässä tapauksessa voidaan ajatella, että nopeammalla HFT-järjestelmällä saavutetaan etua muihin nähden. Etu ei kuitenkaan välttämättä ole niin suuri kuin esimerkiksi arbitraasistrategiassa. Asiaa voidaan tarkastella pohtimalla HFT-kaupankävijän kilpailijaa tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä. Todettiin, että arbitraasistrategiassa HFT-kaupankävijä kilpailee muiden HFT-kaupankävijöiden kanssa. Tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä puolestaan myös muut, esimerkiksi pidemmän aikavälin sijoittajat, reagoivat uutisvirtaan ja julkistuksiin. Tällöin voidaan ajatella, että HFT-kaupankävijät kilpailevat myös muiden, ei pelkästään HFT-sijoittajien kanssa. Tässä tapauksessa HFT-sijoittajien etu muihin nähden on selvä – algoritmi lukee uutisen takuulla nopeammin, kuin muu sijoittaja, joka saattaa havaita uutisen pahimmillaan vasta seuraavan päivän sanomalehdestä.

Nopeat HFT-toimijat toki saavat etua myös muihin HFT-sijoittajiin nähden, mutta tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä maksimaalinen nopeus ei ole yhtä kriittinen, kuin esimerkiksi arbitraasistrategiassa. Hitaampikin HFT-sijoittaja voi saada tällöin etua, koska piensijoittajat ehtivät reagoida uutiseen joka tapauksessa HFT-kaupankävijää myöhemmin. Tähän liittyen olisi syytä tutkia aikaväliä, jolla yksittäinen julkistus tai uutinen vaikuttaa arvopaperin markkinahintaan uutisen julkistamisen jälkeen. Ajatusta tukee Foucaultin, Hombertin ja Rosun (2016) tutkimus, jossa todettiin, että HFT-kaupankävijä voi ennakoida markkinamuutoksia myös pitkällä aikavälillä, vaikka useimmiten HFT-kaupankäynnissä nojataan lyhyen aikavälin hintamuutoksiin. Tapahtumiin perustuva kaupankäyntistrategia voi siis pohjautua lyhyelle tai pidemmälle aikavälille. Lyhyellä aikavälillä kilpailijoina ovat muut HFT-kaupankävijät, jolloin nopeuden merkitys kasvaa. Pidemmällä aikavälillä puolestaan kilpail-

laan myös muita sijoittajia vastaan, jolloin HFT-järjestelmän nopeus ei ole yhtä kriittinen.

Baron ym. (2016) tutkivat myös nopeuden merkitystä Market making -strategiassa. He havaitsivat, että nopeus ratkaisee myös kyseisessä strategiassa. Ratkaisevin tekijä oli suhteellinen nopeus muihin HFT-kaupankävijöihin nähden – absoluuttisella nopeudella sinänsä ei ollut merkitystä, vaan nimenomaan suhteellinen nopeus muihin nähden oli kriittisin tekijä. Nopeus oli ratkaisevasa asemassa sekä aktiivisessa, että myös passiivisessa sijoitusstrategiassa. Tässäkin strategiassa HFT-kaupankävijän kilpailijat ovat enimmäkseen muita HFT-kaupankävijöitä eli Market makereita. Tällöin siis nopeuden merkitys on suuri, koska kaikki HFT-kaupankävijät pyrkivät olemaan tehokkaimpia.

Kaiken kaikkiaan nopeuden ja strategian suhdetta voidaan siis kuvailla seuraavalla tavalla: mitä lyhemmällä aikavälillä kaupankäyntiä toteutetaan, sitä suuremmaksi nopeuden merkitys korostuu. Tällöin HFT-kaupankävijän kilpailijoina ovat muut HFT-kaupankävijät. Tällaisia strategioita ovat esimerkiksi arbitraasi ja Market making. Jos HFT-kaupankävijän kilpailijana ovat myös muut sijoittajat, kuten tapahtumiin perustuvassa kaupankäynnissä todettiin olevan, niin nopeuden merkitys ei ole yhtä suuri. HFT-järjestelmän toimintaa tehostaessa siis voidaan ottaa huomioon myös kaupankäynnin strategiariippuvaisuus. Näissä strategioissa tehokkuuden merkitys ei ole niin suuri, ja kaupankäynnin menestys riippuu myös muista tekijöistä, kuten esimerkiksi luvussa 3 käsitellystä riskienhallinnasta ja äsken mainituista HFT-kaupankävijän kilpailijoista. Tähän liittyen olisi syytä tutkia erilaisten HFT-kaupankävijöiden kaupankäyntistrategioita ja niiden suhdetta muihin sijoittajiin.

4.5 Yhteenveto

HFT-järjestelmien halutaan toimivan mahdollisimman tehokkaasti, jotta kaupankäynnin tuotto on parempaa. Nopeasti toimivalla HFT-järjestelmällä löydetään enemmän edullisia kaupankäyntipositioita erityisesti lyhyen aikavälin strategioissa, jolloin luonnollisesti myös tuotto on parempi hitaampiin HFT-järjestelmiin nähden. On syytä huomioida, että HFT-järjestelmää tehostettaessa tulee kuitenkin huomioida luvussa 3 esiteltyt HFT-järjestelmien vaatimukset.

HFT-järjestelmän tehokkuus pyritään maksimoimaan laitteisto- ja ohjelmistotasolla. Tehokkaimmat implementaatiot käyttävät tällä hetkellä FPGA-piirejä laitteistotasolla, jotka ovat laskentateholtaan parhaita. FPGA-piireille mahdollisia haastajia voisivat olla tulevaisuudessa GPU-piirit, joiden laskentateho on jo likimain sama kuin FPGA-piireillä syötteen kasvaessa tarpeeksi suureksi. Lisätutkimus tähän liittyen on tarpeen.

Ohjelmistotasolla HFT-järjestelmissä käytetään tiedonsiirtoon UDP- ja TCP-protokollia. Alimmalla tasolla käytetään markkinaprotokollia, esimerkiksi FIX:ä, jotka siirretään edellä mainittujen UDP- ja TCP-protokollien avulla. Ohjelmistotasolla HFT-järjestelmien tehokkuus maksimoidaan käyttämällä nopeaa UDP-protokollaa mahdollisimman paljon. Luotettavampaa ja hitaampaa TCP-

protokollaa käytetään ainoastaan kriittisissä toimenpiteissä, esimerkiksi toimeksiantoissa. Pörssidata siirretään markkinaprotokollaviesteinä, kuten FIX:nä. HFT-järjestelmän toimintaa tehostettaessa kannattanee käyttää tietenkin nopeampia markkinaprotokollia, esimerkiksi FAST:a. Käytetty markkinaprotokolla riippunee markkinan tuetuista protokollista ja kaupankävijän omista mieltymyksistä.

Kolmas asia, jolla HFT-järjestelmien tehokkuutta parannetaan, on HFT-laitteiston fyysinen sijoittaminen lähelle markkinapaikkaa. Tällöin tiedonsiirtoon kuuluva viive on minimaalinen, jolloin saavutetaan myös tietoturvallinen ratkaisu verrattuna siihen, että tieto kulkisi pidemmän matkaa. HFT-järjestelmät kannattaa siis aina sijoittaa lähelle markkinoiden palvelimia, koska tällöin sekä tehokkuus, että turvallisuus paranevat. Äärimmillään HFT-järjestelmä voidaan sijoittaa jopa samaan verkkoon markkinoiden palvelimien kanssa.

Edellä mainituilla ratkaisuilla saavutetaan teknisesti mahdollisimman tehokas HFT-järjestelmä. Tehokas järjestelmä ei kuitenkaan itsessään takaa menestystä, koska kaupankäyntiin vaikuttaa myös valittu kaupankäyntistrategia. Tehokkuuden merkitys vaihtelee strategiasta riippuen ja strategian on tietysti oltava toimiva, jotta kaupankäynnillä voidaan saavuttaa taloudellista menestystä. Jos esimerkiksi HFT-järjestelmän riskienhallinta ei ole vaaditulla tasolla, ei tehokkainkaan HFT-järjestelmä takaa taloudellista menestystä. Alaluvussa 3.3 todettiin, että yritykset hallitsevat riskejä nimenomaan taloudellisten tappioiden välttämiseksi. Optimaalisin ratkaisu saavutetaan kaiketi, kun kaikki osatekijät (tehokkuus, turvallisuus sekä riskienhallinta) täyttävät HFT-järjestelmien vaatimukset. HFT-järjestelmän tehostaminen vaatii siis teknisen osaamisen lisäksi ammattitaitoa myös arvopaperimarkkinoiden saralta, jotta HFT-järjestelmän kaupankäyntistrategian ja teknisen toteutuksen kokonaisuus kykenee käymään kauppaa menestyksekkäästi. Aiheeseen liittyen voisi tutkia esimerkiksi HFT-kaupankäynnin riskienhallinnan merkitystä suhteessa taloudelliseen tuottoon olettaen, että HFT-kaupankäynnin muut vaatimukset (tehokkuus ja turvallisuus) ovat kunnossa.

5 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa käsiteltiin HFT-järjestelmien tehokkuuden parantamista. Aihetta tutkittiin HFT-järjestelmien vaatimusten ja nykyisten HFT-ratkaisujen pohjalta, joiden perusteella pyrittiin löytämään HFT-järjestelmien tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja tapoja, jolla nämä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien toimintaan. HFT-järjestelmien tehostamista tarkastellessa pyrittiin kiinnittämään huomiota teknisen näkökulman lisäksi myös taloustieteelliseen näkökulmaan sekä näiden keskinäiseen synteisiin. Tutkimusongelmaan pohjautuneet tutkimuskysymykset olivat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien tehokkuuteen?
- Millä tavoin nämä tekijät vaikuttavat HFT-järjestelmien toimintaan?

Tutkimus on tehty kirjallisuuskatsauksena, jonka lähdemateriaaleina olivat aiheeseen liittyvät ja sitä sivuavat julkaisut. Lähteitä etsittiin erilaisista tieteellisistä hakukoneista sekä tietokannoista ja valittujen lähteiden kriteereinä käytettiin muun muassa Julkaisufoorumin tasoluokitusta, viittausten määrää, tekijän tai tekijöiden aiempaa alan kontribuutiota sekä julkaisun yhtenäisyyttä muiden tutkimusten kanssa. Osa käytetyistä lähteistä löytyi selaamalla jo tutkimuksessa käytettyjen julkaisujen lähteitä.

Johdannossa motivoitiin lukijaa sekä tuotiin ilmi aihepiirin tutkimukseen liittyvät ongelmat. Toisessa luvussa käsiteltiin HFT-järjestelmiä yleisesti teknisellä tasolla sekä tarkasteltiin erilaisia kaupankäyntistrategioita, joita HFT-kaupankäynnissä käytetään. Kolmas luku käsitteli HFT-järjestelmien vaatimuksia, joiden avulla HFT-järjestelmä toimii halutulla tavalla. Neljännessä luvussa käsiteltiin tapoja, joilla HFT-järjestelmien toimintaa voidaan tehostaa. Analyysin pohjana olivat luvuissa kaksi ja kolme käsitellyt asiat.

Johdannossa todettiin, että yritykset pyrkivät parantamaan HFT-järjestelmiensä tehokkuutta yhä enemmän ja enemmän. Luku 2 käsitteli nykyisten HFT-järjestelmien yleisimpiä ratkaisuja. Siinä todettiin, että kaupankäyntistrategioita on useita ja valittu strategia riippuu toimijasta. Luvussa 2 käsiteltiin myös HFT-järjestelmien teknistä toteutusta. Kävi ilmi, että nykyisin HFT-

järjestelmissä käytetään useimmiten FPGA-piirejä laitteistotasolla, koska ne ovat laskentateholtaan verrattain tehokkaita. Ohjelmistossa käytetään tiedonsiirrossa useimmiten UDP-, TCP ja FIX-protokollia ja käytetty protokolla riippuu muun muassa tiedonsiirron vaaditusta luotettavuudesta. TCP-protokollan todettiin olevan hitaampi, mutta luotettavampi kuin UDP:n. Toisaalta tiedonsiirron halutaan olevan mahdollisimman nopeaa, minkä vuoksi UDP-protokollaa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon. Todettiin, että markkinadatan siirtämiseen käytetään alimmalla tasolla useimmiten FIX-protokollaa, mutta olemassa on myös muita protokollia. Kolmannen luvun tarkoituksena oli tuoda esiin HFT-järjestelmien vaatimukset, joita ovat tehokkuus, turvallisuus ja riskienhallinta. Järjestelmän tehokkuuden nähtiin korostuvan, koska se takaa yrityksille isommat voitot hitaampiin järjestelmiin verrattuna. Tehokkuutta tarkasteltiin tutkimalla erilaisten HFT-implementointien kokonaisviivettä. Kävi ilmi, että tehokkaimmat HFT-ratkaisut on saavutettu alaluvussa 2.2 käsiteltyjen FPGA-piirien avulla. Alaluvussa 3.2 puntaroitiin HFT-järjestelmien turvallisuutta sekä mahdollisten turvallisuusaukkojen negatiivisia vaikutuksia markkinoihin. Sen mukaan turvallisuus sinänsä on HFT-kaupankäynnissä tärkeä asia ja mahdolliset turvallisuusaukot voisivat korostua erityisesti laajoissa verkoissa. Kuitenkin, HFT-järjestelmät todettiin sijoitettavan lähelle markkinoiden palvelimia, jolloin HFT-järjestelmien turvallisuusriskit pienenevät. Tällöin saavutetaan turvallinen ja tehokas tiedonsiirto HFT-järjestelmän ja markkinan välillä. Alaluvussa 3.3 esiteltiin HFT-järjestelmien riskienhallintamenetelmiä sekä arvioitiin HFT-kaupankäynnin vaikutusta markkinoihin. Kävi ilmi, että yritykset tekevät riskienhallintaa, koska se takaa paremman taloudellisen menestyksen kaupankäynnissä. Samalla markkinoihin kohdistuva riski pienenee.

Edellä mainitut asiat olivat pohjana luvulle 4, jossa tarkasteltiin HFT-järjestelmien toiminnan tehostamista. Luku toi esiin sen, että tämän hetkiset FPGA-piireihin pohjautuvat ratkaisut ovat jo todella nopeita eikä tiedossa ole, voidaanko HFT-järjestelmien tehokkuutta parantaa yhä enemmän laitteistotasolla. Alaluvussa 4.1 tarkasteluun nostettiin GPU-piirit, joiden suorituskyvyn todettiin olevan liki FPGA-piirejä. GPU-piirien hyödyntämistä HFT-järjestelmissä olisi syytä tutkia, koska järjestelmien toimintaa halutaan tehostaa yhä enemmän. Alaluvussa 4.2 todettiin, että nopeita protokollia kannattaa käyttää tiedonsiirtoon. On kuitenkin muistettava, että kriittisissä toimenpiteissä on käytettävä luotettavia protokollia, kuten TCP:tä, eikä tehokkuutta voida parantaa luotettavuuden kustannuksella. Alaluku 4.3 käsitteli osittain jo mainittua laitteiston fyysistä sijaintia suhteessa markkinapaikkaan. Taulukossa 2 esiteltiin tiedonsiirtoviiveet eri kaupunkien välillä, josta saa hyvän kuvan aiheutuvasta viiveestä. On helppo todeta, että laitteiston fyysinen sijainti näyttölee merkittävää roolia HFT-järjestelmien tehokkuudessa nimenomaan viiveen muodossa. Viive voidaan minimoida sijoittamalla siis HFT-järjestelmät lähelle markkinapaikkaa. Alaluvun 4.4 tarkoituksena oli herättää ajatuksia tehokkuuden ja kaupankäyntistrategian suhdetta sekä kritisoida pelkän HFT-järjestelmän tehokkuuden maksimoimista teknisestä näkökulmasta. Luvussa todettiin, että tehokkuus kyllä vaikuttaa HFT-toimijoiden taloudelliseen tuottoon, mutta luvussa

heräteltiin ajatuksia myös sille, että tehokkuuden merkitys saattaa vaihdella kaupankäyntistrategiasta riippuen. Tässä tapauksessa vaikutuksen ajateltiin johtuvan HFT-kaupankävijän kilpailijoista, eikä millisekuntien viiveellä tällöin ole väliä, jos HFT-kaupankävijä kilpailee pidemmän aikavälin sijoittajia vastaan. Sen lisäksi todettiin, että pelkkä HFT-järjestelmän tehokkuus ei riitä taloudellista tuottoa tavoitellessa, jos esimerkiksi kaupankäyntistrategian riskienhallinta ei ole vaaditulla tasolla. Tähän liittyen jatkotutkimusaiheeksi todettiin HFT-kaupankäynnin riskienhallinnan merkitys suhteessa taloudelliseen tuottoon.

Kaiken kaikkiaan voidaan siis todeta, että kirjallisuuden ja julkaisujen perusteella HFT-järjestelmän tehokkuuteen vaikuttaa laitteisto, ohjelmisto, laitteiston fyysinen sijainti sekä kaupankäynnissä käytetty strategia. Edellä mainitut tekijät esiintyivät eniten julkaisuissa ja ne valittiin tutkimukseen sen pohjalta. Tämä tutkimus ei poissulje muiden menetelmien käyttöä HFT-järjestelmän toimintaa tehostettaessa. Ensimmäiset kolme tekijää vaikuttavat HFT-järjestelmän toimintaan enimmäkseen tehokkuuden ja sitä kautta viiveen kautta. Kaupankäyntistrategia puolestaan ei suoraan vaikuta järjestelmän tehokkuuteen, mutta se voi muodostua pullonkaulaksi, vaikka edellä mainitut kolme asiaa olisivatkin kunnossa. Tämän vuoksi kaupankäyntistrategiassa olevat puutteet eivät ole korvattavissa tehokkaimmallakaan järjestelmällä. Riskienhallinta eli kaupankäyntistrategiset seikat ovat tärkeässä osassa kun HFT-järjestelmän halutaan menestyvän. Riskienhallinnan laiminlyönti siis turmelee HFT-järjestelmän menestyksen, vaikka tehokkuus ja turvallisuus olisivatkin hyvällä tasolla. Saadut tutkimustulokset tarjoavat yleiskuvan HFT-järjestelmien teknistaloudellisesta näkökulmasta. Mahdollinen jatkotutkimusaihe voisi olla esimerkiksi se, kuinka paljon HFT-järjestelmien tehokkuutta voidaan alati parantaa. Sen lisäksi olisi syytä tutkia, saadaanko tehokkuudesta enää samanlaista kaupankäyntietua kuin aikaisemmin, kun tehokkaat HFT-järjestelmät yleistyvät ja tiedonsiirtoviiheet laskevat yhä enemmän.

LÄHTEET

- Aldridge, I. (2013). *High-frequency trading: A practical guide to algorithmic strategies and trading systems* (2. painos). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Angel, J. J. & McCabe, D. (2013). Fairness in financial markets: The case of high frequency trading. *Journal of Business Ethics*, 112(4), 585-595.
- Awad, M. (2009). FPGA supercomputing platforms: A survey. *International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, (s. 564-568). Prague: IEEE.
- Baron, M. D., Brogaard, J., Hagströmer, B. & Kirilenko, A. A. (2016). Risk and return in high frequency trading. Haettu osoitteesta <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2433118>
- Basak, S. & Shapiro, A. (2001). Value-at-risk-based risk management: Optimal policies and asset prices. *Review of Financial Studies*, 14(2), 371-405.
- Bishop, M. (2003). What is computer security? *IEEE Security & Privacy*, 1(1), 67-69.
- Bodnar, G. M., Hayt, G. S. & Marston, R. C. (1998). 1998 wharton survey of financial risk management by US non-financial firms. *Financial Management*, 27(4), 70-91.
- Brogaard, J. (2010). *High frequency trading and its impact on market quality*. Working paper. Northwestern University Kellogg School of Management.
- Brogaard, J., Hendershott, T. & Riordan, R. (2014). High-frequency trading and price discovery. *Review of Financial Studies*, 27(8), 2267-2306.
- Cartea, Á. & Jaimungal, S. (2015). Risk metrics and fine tuning of high-frequency trading strategies. *Mathematical Finance*, 25(3), 576-611.
- Dixon, M., Chong, J. & Keutzer, K. (2009). *Proceedings of the 2nd Workshop on High Performance Computational Finance*, (5). Portland: ACM.
- Fall, K. R. & Stevens, W. R. (2011). *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The protocols*. (2. painos). Addison-Wesley.
- Foucault, T., Hombert, J. & Roşu, I. (2015). News trading and speed. *The Journal of Finance*, 71(1), 335-382.
- Gomber, P., Arndt, B., Lutat, M. & Uhle, T. (2011). High-frequency trading. Haettu osoitteesta: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1858626>
- Gomez-Pulido, J. A., Vega-Rodriguez, M. A., Sanchez-Perez, J. M., Priem-Mendes, S. & Carreira, V. (2011). Accelerating floating-point fitness functions in evolutionary algorithms: A FPGA-CPU-GPU performance comparison. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 12(4), 403-427.
- Hagenau, M., Liebmann, M., Hedwig, M. & Neumann, D. (2012). Automated news reading: Stock price prediction based on financial news using context-specific features. *Proceedings of the 45th annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, (s. 1040-1049). Maui, HI: IEEE.

- Harris, B. & Hunt, R. (1999). TCP/IP security threats and attack methods. *Computer Communications*, 22(10), 885-897.
- Hau, H. (2001). Location matters: An examination of trading profits. *The Journal of Finance*, 56(5), 1959-1983.
- Hendershott, T. & Riordan, R. (2009). Algorithmic trading and information. Manuscript. University of California.
- Hendershott, T., Jones, C. M. & Menkveld, A. J. (2011). Does algorithmic trading improve liquidity? *The Journal of Finance*, 66(1), 1-33.
- Hong, L., Zhong-hua, L. & Xue-bin, C. (2010). The applications and trends of high performance computing in finance. *The Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business Engineering and Science (DCABES)*, (s. 193-197). Hong Kong: IEEE.
- FIX Trading Community. FIX Protocol Application Layer. Haettu osoitteesta <http://www.fixtradingcommunity.org/pg/structure/tech-specs/fix-protocol>
- QuickFIX. Haettu osoitteesta <https://sourceforge.net/projects/quickfix/>
- Jarrow, R. A. & Protter, P. (2012). A dysfunctional role of high frequency trading in electronic markets. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 15(03), 1250022.
- Johnson, L. L. (1960). The theory of hedging and speculation in commodity futures. *The Review of Economic Studies*, 27(3), 139-151.
- Kirilenko, A. A., Kyle, A. S., Samadi, M. & Tuzun, T. (2015). The flash crash: The impact of high frequency trading on an electronic market. Haettu osoitteesta <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1686004>
- Kohlhoff, C. & Steele, R. (2003). Evaluating SOAP for high performance business applications: Real-time trading systems. Haettu osoitteesta <http://www2003.org/cdrom/papers/alternate/P872/p872-kohlhoff.html>
- Lakshman, T. V. & Madhow, U. (1997). The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth-delay products and random loss. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(3), 336-350. Haettu osoitteesta <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=611099>
- Leber, C., Geib, B. & Litz, H. (2011). High frequency trading acceleration using FPGAs. *21st International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, (s. 317-322). Chania, Greece: IEEE.
- Li, Y. T., Leith, D. & Shorten, R. N. (2007). Experimental evaluation of TCP protocols for high-speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 15(5), 1109-1122. Haettu osoitteesta <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4346548>
- Litz, H., Leber, C. & Geib, B. (2011). DSL programmable engine for high frequency trading acceleration. *Proceedings of the Fourth Workshop on High Performance Computational Finance (WHPCF)*, (s. 31-38). Seattle: ACM.
- Lockwood, J. W., Gupta, A., Mehta, N., Blott, M., English, T. & Vissers, K. (2012). A low-latency library in FPGA hardware for high-frequency trading

- (HFT). *Proceedings - 2012 IEEE 20th Annual Symposium on High-Performance Interconnects (HOTI)*, (s. 9-16). Santa Clara, California: IEEE.
- Malinowski, A., & Yu, H. (2011). Comparison of embedded system design for industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(2), 244-254.
- Menkveld, A. J. & Yueshen, B. Z. (2015). The flash crash: A cautionary tale about highly fragmented markets. Haettu osoitteesta <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2243520>
- Monmasson, E. & Cirstea, M. N. (2007). FPGA design methodology for industrial control systems – A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(4), 1824-1842.
- Narang, R. K. (2013). *Inside the black box : A simple guide to quantitative and high frequency trading* (2. painos). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Postel, J. (1980). RFC 768: User datagram protocol.
- Postel, J. (1981). Internet protocol.
- Poterba, J. M. & Summers, L. H. (1984). The Persistence of Volatility and Stock Market Fluctuations. *American Economic Review*, December 1986, 1142-1151
- Preis, T. (2011). GPU-computing in econophysics and statistical physics. *The European Physical Journal Special Topics*, 194(1), 87-119.
- Ross, S. A. (1976). The arbitrage theory of capital asset pricing. *Journal of Economic Theory*, 13(3), 341-360.
- Sadoghi, M., Labrecque, M., Singh, H., Shum, W., & Jacobsen, H. A. (2010). Efficient event processing through reconfigurable hardware for algorithmic trading. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 3(1-2), 1525-1528.
- Savani, R. (2012). High-frequency trading: The faster, the better? *IEEE Intelligent Systems*, 27(4), 70-73.
- Schwert, G. W. (1989). Why does stock market volatility change over time? *The Journal of Finance*, 44(5), 1115-1153.
- Shefrin, H. & Statman, M. (1992). Ethics, fairness, efficiency, and financial markets.
- Securities and exchange commision (2010). Concept Release on Equity Market Structure. Haettu osoitteesta <https://www.sec.gov/rules/concept/2010/34-61358.pdf>
- Socolofsky, T. & Kale, C. (1991). RFC 1180-TCP. Haettu osoitteesta <https://tools.ietf.org/html/rfc1180>
- Thomas, D. B., Howes, L., & Luk, W. (2009). A comparison of CPUs, GPUs, FPGAs, and massively parallel processor arrays for random number generation. *Proceedings of the ACM/SIGDA international symposium on Field programmable gate arrays* (s. 63-72). Monterey, California: ACM.