

Fázisérzékeny detektálás egy olcsó mérőkártyával

Phase-sensitive detection with a low cost DAQ USB device

Kóházi-Kis Ambrus *

¹Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

Kulcsszavak:

fázisérzékeny detektálás,
LabVIEW,
gyenge jelek.

Keywords:

Phase-sensitive detection,
LabVIEW,
weak signals.

Cikktörténet:

Received 2017. szeptember 18
Revised 2017. október 2.
Accepted 2017. október 21.

Összefoglalás

Fázisérzékeny detektálást gyenge jeleknek nagy háttérzaj mellett történő érzékelésére szokták alkalmazni. Az erre a célra megvásárolható, úgynevezett lock-in erősítők igen drágák. Megvalósítható azonban ez az érzékeny mérési eljárás sokkal olcsóbban is, mint ahogyan ezt már sokan az aktuálisan rendelkezésre álló technikai eszközparkkal bemutatták. Beszámolok egy olcsó mérőkártyával LabVIEW programmal megvalósított eszköz megépítéséről és teszteléséről.

Abstract

Phase-sensitive detection is applied for detecting weak signals from a noisy background. The commercial lock-in detectors are quite expensive. This sensitive measurement can be arranged with much cheaper tools also, as it was reported in several publications adopting different tools. I report on a cheap lock-in detector built with an USB DAQ device programmed in a LabVIEW environment.

1. Bevezetés

Háttérzaj mellett megjelenő jelek érzékelésére széles körben alkalmazzák az úgynevezett fázisérzékeny detektálás, vagy lock-in detektálás módszerét (LIA Lock-In Amplification)[1]. Ennek lényege, hogy a vizsgált rendszer amplitúdó-modulált gerjesztés hatására adott válaszjelét a gerjesztő jel frekvenciáján detektáljuk[2]. Az érzékelés annál érzéketlenebb a jelet esetleg elfedő zajra, minél kevesebb zajtartalom van a gerjesztés és egyben a detektálás spektrális tartományában [3]. A detektorainkban, mérőrendszereinkben óhatatlanul megjelenik 1/f-, vagy Flicker-, vagy rózsaszín zaj [4], ami következtében az alacsony frekvenciák irányában (jellemzően 100 Hz alatt) a detektálás zaja jelentősen megnövekszik. Ezért célszerű mérésünket a magasabb frekvencia-tartományba konvertálnunk a gerjesztő jel modulálásával.

Ezen az elven működő kiváló műszerek kaphatók kereskedelmi forgalomban is – meglehetősen borsos áron, jellemzően néhány millió Ft-ért (lásd például [5]), bár kapható használt készülék is tizedannyiért is [6]. Lock-in detektorok számos házi-készítésű megvalósításáról olvashatunk a szakirodalomban ([7] - [14]). Ezen munkák célja egyrészt a kommersz eszközöknél egy olcsóbb megvalósítás bemutatása, másrészt a lock-in detektor működésének pedagógiai célból történő demonstrálása.

Ebben a közleményben a lock-in detektálás egy megvalósításáról, és az ezzel kapcsolatos vizsgálataimról számolok be. Egy He-Ne lézer fényét egy forgótárcsával szaggattam meg. A vizsgált fény által keltett fotodetektor jelének felüláteresztő szűrővel szűrt jelét egy referencia-detektor jelével egyidejűleg mértem egy mérsékelten drága (nagyságrendileg 100 eFt értékű NI USB 6002) mérőkártya

*Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516436; fax: +36 76 516299
E-mail cím: kohazi-kis.ambrus@gamf.kefo.hu

segítségével. A lock-in detektáláshoz szükséges jelek szorzását már a LabVIEW rendszerben [15] szoftveresen valósítottam meg. A bemutatott módszer azon laborok számára tűnik jó megoldásnak, amelyek nem dúskálnak beruházási erőforrásokban, de rendelkezésükre áll a LabVIEW programcsomag.

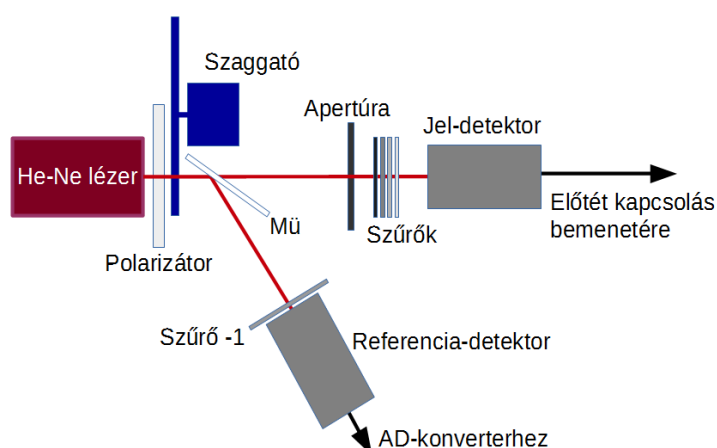
A mérés ezen módszerét magyarul fázisérzékeny detektálásnak [16] vagy szinkron egyenirányításnak [17] is szokás nevezni. Már Bay Zoltán is lényegében ezt a mérési elvet alkalmazta a holdradar kísérletsorozata [18] során: a periodikus kiadott radarjelekre érkezett válaszok különböző késleltetési időhöz tartozó elektromos jeleinek erősségét egy, a későbbiekben, coulométernek elnevezett elektrolízis elvén működő módszerrel összegezte. Tanulmányában azonban arról ír, hogy összegző módszere már előtte is ismert volt a televízió-technikában (lásd a [19] hivatkozás 127. oldalán). Az angol nyelvű szakirodalomban R. Dicke nevéhez szokás kötni a lock-in mérési technika kifejlesztését [1].

Fázisérzékeny detektálást akkor szoktak alkalmazni, ha a mérő által kiváltott jelre adott válaszul kapott mérendő jelet nála esetleg lényegesen erősebb zaj mellől kell észlelni [20, 21, 3].

A zaj spektrális eloszlását lehet kihasználni annak elkülönítésére. A diszkrét jellegű zajforrások frekvenciájának (pl. az 50 Hz-es szórt elektromágneses zaj) elkerülésével kell a kiváltó, és ezzel együtt a referencia, jelünk frekvenciáját megválasztani. A folytonos spektrális eloszlású zajforrások hatását egyrészt azzal minimalizálhatjuk, hogy a referencia frekvenciát úgy választjuk meg, hogy közelében a háttérzaj spektrális erőssége kicsi legyen. Ez jellemzően azt jelenti, hogy referencia frekvenciánkat minél nagyobbra válasszuk, hogy elkerülhessük a Flicker-zajt [4].

A vizsgált jelnek és a referencia jelnek az összeszorozásával emeljük ki a zajból a hasznos jelünket. Fontos, hogy a vizsgált rendszert egy stabilizált frekvenciával gerjesszük, hogy az erre adott válaszból is szigorúan ezen frekvenciájú komponenst emelhessük ki, mint hasznos jelet. A gerjesztő és így a referencia jel frekvenciájának annál stabilabbnak kell lennie, minél pontosabb mérést akarunk végezni, hiszen a spektrális felbontás mértéke fordítottan arányos a mérés időtartamával. Ez egyben azt is jelenti, hogy a pontos mérés rendszerint lassú is. Ha a referencia és a gerjesztett jel nincsen feltétlenül fázisban, akkor referencia jellel és annak 90 fokkal eltolt változatával is meg kell a jelünket szorozni és az így kapott kiátlagolt értékeket négyzetesen összegezni kell [1].

2. A megépített fázisérzékeny detektor



1. ábra. A mérési elrendezés elvi vázlatja

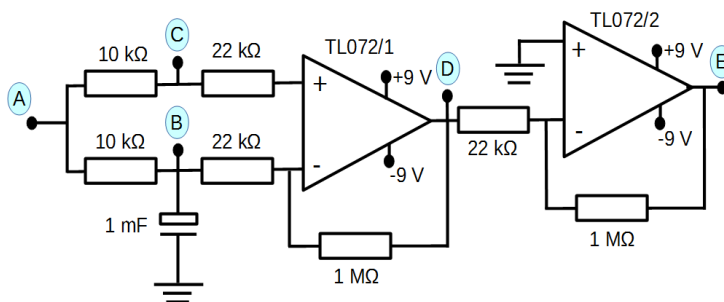
Egy digitális lock-in detektort építettem meg (lásd az 1. ábrát), amiben a referencia és a vizsgált jelek szorzása már ezen jelek digitalizálása után szoftveresen történik. Az 1. ábra a lock-in detektor tesztelésére megépített elrendezést mutatja, ebben a szűrők csillapítása ismert, ez kifejezetten a detektor kalibrálását segíti. Amikor a detektorunkat már kalibráltuk, akkor a szűrők helyére a vizsgált rendszert kell helyettesíteni.

A He-Ne lézer (UniPhase model 1108P 7 mW-os névleges teljesítményel) már eredetileg is polarizált fényt szolgáltat, de a polarizációs állapot fixálása érdekében egy nagy kioltási arányú polarizátorral vízszintes polarizációs állapotot állítottam be. Az 1. ábrán „Mű”-vel jelölt mikroszkópüveget közel Brewster-szöges (~56 fok) kidöntési szöggel állítottam be, hogy a referencia-detektorra a lézerből kijövő fénynyalábnak csak kevesebb, mint egy százaléka jusson. A referencia-detektor telítődését így is egy közel 100-as gyengítésű szürke szűrővel akadályoztam meg. A szűrő azért is hasznos volt, hogy a szórt fény esetleges változásainak hatását mérsékelje a referencia-jel kialakításában. Így is csak a fényforrások lekapcsolását követően lehetett mérni, mert a teljesítménycsökkentő szűrő ellenére így is erősen beszóródott a referencia-detektorba a neonlámpák villogása.

A He-Ne lézer teljesítményét megmértem egy Newport 1918R modelszámú teljesítmény-mérővel lemértem a He-Ne lézer teljesítményét a jel-detektor bemeneténél, továbbá lemértem a laborunkban talált abszorpciós szürke szűrősorozatunk abszorpcióit. Ezek csillapításainak együttes értéke elérte a 8 nagyságrendű intenzitáscsillapítást. A szűrősor megfelelő kombinációjával közel másfélszeres lépésenként tudtam változtatni a szűrőkön átengedett fénynyaláb teljesítményét.

A fénynyalábot egy DVD-íróból kisserelt egyszerű egyenáramú motorral megforgatott szabályos, 5 réses szaggató tárcsával szaggattam meg. A DC motort egy PC tápegység 12 V-os kimenetének potméterrel leosztott áramával működtettem. A lock-in erősítő működtetéséhez másodpercenként 175 szaggatást állítottam be, ami a forgótárcsa ötös osztásának megfelelően másodpercenként 35-ös fordulatszámúnak felelt meg. A DC motor futása szép egyenletes volt, másodperces intervallumon bőven tartotta az 1 Hz alatti frekvenciastabilitást, viszont az 1 perces időtartamon már 5-10 Hz-es frekvencia eltolódást lehetett tapasztalni az optikai jel szaggatási frekvenciájában. Az általam alkalmazott 1 s-os mérési időtartamokon a tárcsa fordulatszámának ilyen ingadozása nem jelent gondot, de nagyobb pontossághoz, hosszabb idejű mérés érdekében a meghajtó motor fordulatszámát stabilizálni kell.

A referencia- és a jel-detektorok jeleit NI USB 6002-es analóg-digitális átalakító kártyával [22] digitalizáltam. A referencia-detektor (házi készítésű Si detektor) jelét közvetlenül az AD kártya Ai0-ás bemenetére kötöttem. A jel-detektor (Edmund-optics, Si Photodiode Receiver Module) jelét a 2. ábrán látható áramkör „A” pontja és a föld közé kötöttem. A 2. ábrán látható kapcsolás nem szükséges a lock-in detektor alkalmazása során, az csak a tesztelés igényeit célozza kielégíteni. Az áramkör tápellátását kettő 9 V-os Ni:MH akkumulátorral biztosítottam. Háromféle módon is vizsgáltam a lock-in detektálás hatékonyságát. A legegyszerűbb esetben az AD kártya Ai1 mérőérrintkezőit a 2. ábrán is jelölt „B” és „C” pontokra kötöttem – ebben az esetben a műveleti erősítőknek nincs is szerepe, a kapcsolás ilyenkor csupán egy közelítőleg 0,5 Hz-es felüláteresztő szűrő szerepét játssza. Az AD konverter véges jelfelbontási képessége (-10 – +10 V méréstartományban 16 bites átalakítás 0,3 mV-os digitalizálási lépésközt jelent) miatt a gyengébb jelek megfigyeléséhez a bemenő jelet erősíteni kell. A TL072/1 műveleti erősítő által jó közelítéssel 45-szeresére erősített jel („D” és a föld) került az AD kártya Ai2-es bemenetére. A TL072/2 műveleti erősítővel még 45-szeresére növeltem még a digitalizálás előtt a jelet, amelyet („E” és a föld pont) az AD kártya Ai3-as bemenetére juttattam.



2. ábra. Az előtétáramkör kapcsolás

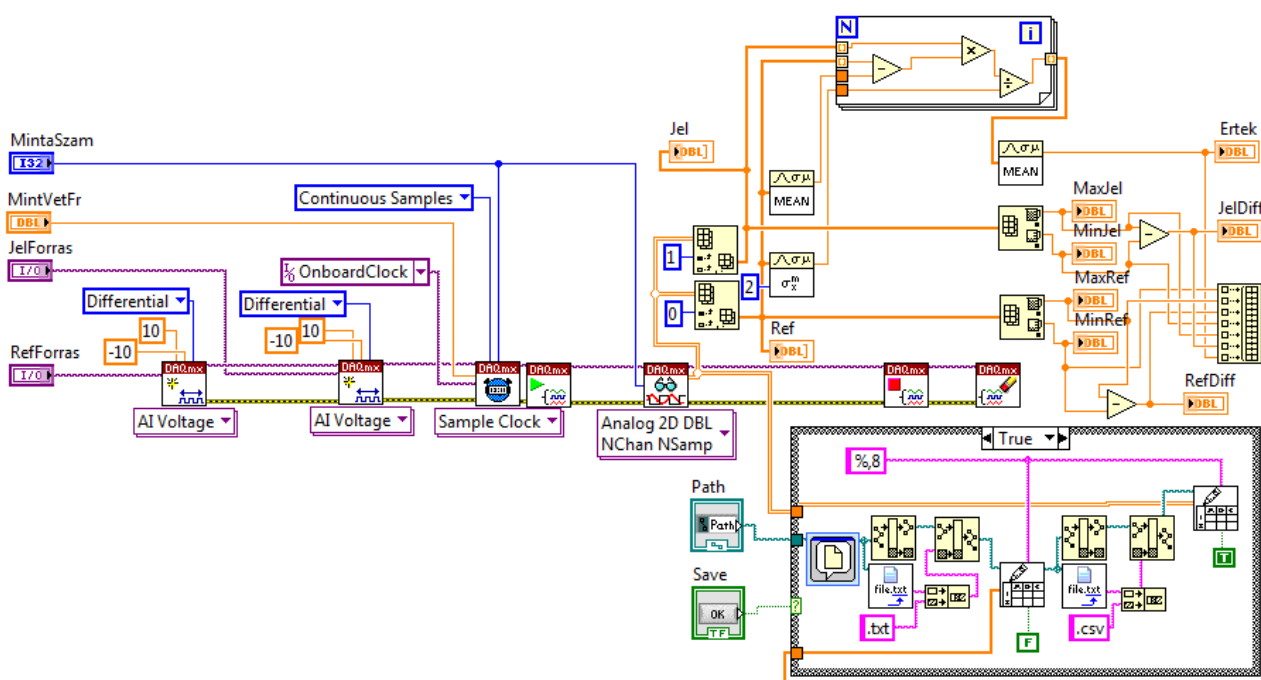
A detektor vezérlésére LabVIEW-programot készítettem. A vezérlő felületen lehet megadni a referencia és a jel forrásait, a mintavételezési frekvenciát és a mintavételezett jelpárok számát. A programmal a mérőkártya belső időzítőjével vezérelten párosával mérték a referencia- és vizsgált jelek

értékeit. Erre azért volt szükség, mert a PC-vel nem tudtam szigorú időzítésű méréssorozatot elvégezni, azt gondolom, hogy alapvetően a Microsoft rendszer (Windows 7) szerzteágazó elfoglaltságai miatt.

A tesztelő program (lásd az 3. ábrát) kirajzolja a mért adatsorokat a „Jel” és a „Ref” grafikonokra. Az 5. ábra felső részén látható ciklusban zajlik a lock-in eljárás lényege. A ciklus az adatsorok elemein végez műveleteket. A referencia jelből kivonja átlagát, ezzel nulla átlagú periodikus jelet állít elő, amellyel beszoroztam vizsgált jelet. A referencia és a vizsgált jelek szorzatát átlagoltam, ezzel lényegében kiemeltem az esetlegesen zajba temetett válaszjelből a kifejezetten a periodikus gerjesztésünkre adott rendszerválaszt:

$$\text{Ertek} = \frac{\text{Jel} \cdot (\text{Ref} - \overline{\text{Ref}})}{(\text{Ref} - \overline{\text{Ref}})^2}, \quad (1)$$

ahol a felülvonás a mérési időtartamra történő átlagolást jelenti. Az eredménynek a referencia jel szórásnégyzetével történő leosztásának az értelme, hogy a vizsgált rendszer jelcsillapítási értékéből kiküszöböljük a lézerünk teljesítmény-ingadozásának hatását.



3. ábra. A lock-in detektálást vezérlő LabVIEW program

A lock-in detektálás eredményül kapott értéket az „Ertek” változóban jeleníttem meg a kezelőfelületen (lásd a 3).

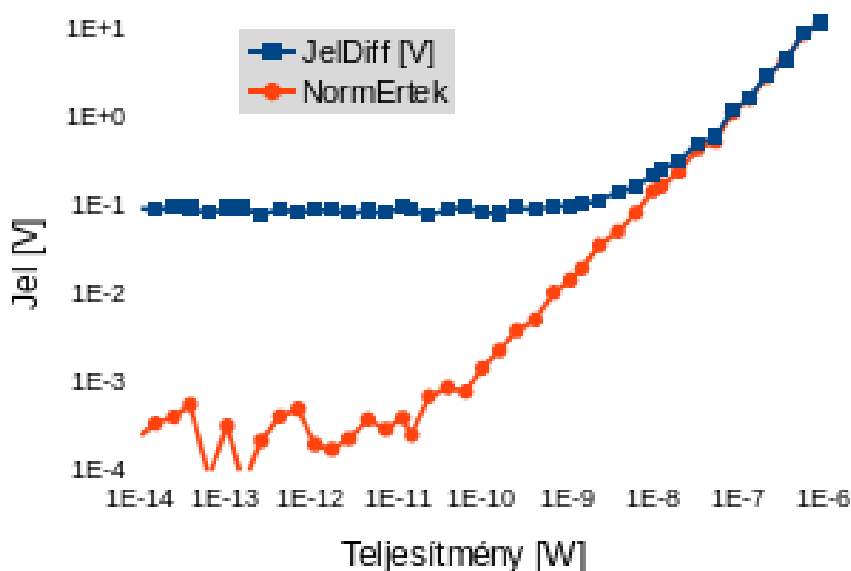
A referencianyaláb teljesítményének ingadozásának megfigyelhetőségére a program kiszámolja és meg is jeleníti a referencia jelsorozat minimumának és maximumának különbségét („RefDiff”). Továbbá a zaj és a hasznos jel összehasonlíthatósága céljából a program kiszámolja a hasznos jelnek is a minimumának és maximumának különbségét, amelyet a kezelő felület „JelDiff”-ként jelenít meg.

A program lehetőséget nyújt az egyes mérések adatsorainak és a program által már kiszámolt értékeknek elmentésére is (lásd az 3. ábra jobb alsó sarkában található feltételes elágazás-blokkot).

3. A detektor érzékenysége

A különböző mértékben erősített jelekkel egy másodperces átlagolási idő mellett megvizsgáltam a lock-in detektor mérési tartományát. A szűrőssal széles tartományban tudtam a vizsgált jel de-

tektorára jutó fénytjeljesítményt változtatni (lásd a 4. ábrát). Úgy találtam, hogy az erősítetlen jelek esetén még a mérőkártya bitfelbontása korlátozza a detektálás érzékenységét, viszont ez egyszeri (45-szörös) erősítés után már a jel háttérzaja akadályozza meg a még kisebb jelek detektálását. Nagy jelek esetén a zajból jelentősen kiemelkedő jelhez számolt érték („Ertek”) hozzá-normálható a jelek magasságához, így keletkezett a „NormErtek” változó. Amikor a jel csökken, akár a zaj szintje alá is, akkor a „JelDiff” értéke már nem csökken, azt a zaj nagysága határozza meg. Viszont látható a 4. ábráról, hogy a lock-in technikával kiváltott jel nagyságát akkor is mérhetjük, ha annak erőssége („NormErtek”) lényegesen kisebb, mint a rendszer zaja („JelDiff”).



4. ábra. Az egyszer, 45-szörösére erősített jelek lock-in detektálása

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 “A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Pallasz Athéné Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Hivatkozások

- [1] Lock-in amplifier, Wikipédia, https://en.wikipedia.org/wiki/Lock-in_amplifier Letöltés ideje: 2017.08.07.
- [2] Stanford: About Lock-In Amplifiers, Stanford Research Systems, Application Note #3, 2006, see <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>, Letöltés ideje: 2017.08.07.
- [3] J.A.D. Pintle, “Fourier-description of lock-in”, Revista Mexicana de Fisica, E59, 1-7 (2013).
- [4] Flicker noise, Wikipédia, https://en.wikipedia.org/wiki/Flicker_noise, Letöltés ideje: 2017.08.07.
- [5] Comparison of various Lock-in Amplifiers, VIN KAROLA INSTRUMENTS, <http://www.vinkarola.com/pdf/Lock-InAmplifiersComparison.pdf>, Letöltés ideje: 2017.08.07.

- [6] Lock-in Amplifier, eBay Inc., <http://www.ebay.com/bhp/lock-in-amplifier>,
Letöltés ideje : 2017.08.07.
- [7] P.A. Temple, "An introduction to phase-sensitive amplifiers : An inexpensive student instrument", *Am. J. of Phys.*, 43, 801-807 (1975).
- [8] X. Wang, "Sensitive digital lock-in amplifier using a personal computer", *Rev. Sci. Instrum.*, 61, 1999-2001 (1990).
- [9] P. Kromer, R. Robinett, R. Bengston, C. Hays, "PC-based Digital Lock-In Detection of Small Signals in the Presence of Noise", *Rev. Sci. Instrum.*, 65, 129-133 (1999).
- [10] S.K. Sengupta, J.M. Farnham, J.E. Whitten, "A Simple Low-Cost Lock-In Amplifier for the Laboratory", *J. of Chem. Educ.*, 82, 1399-1401 (2005).
- [11] M. Andersson, L. Persson, T. Svensson, S. Svanberga, "Flexible lock-in detection system based on synchronized computer plug-in boards applied in sensitive gas spectroscopy", *Rev. Sci. Instrum.*, 78, 113107 (2007).
- [12] P.Q. Trieu, N.A. Duc, "", *VNU J. of Sci., Math.-Phys.*, 24, 239-244 (2008).
- [13] L.E. Bengtsson, "A microcontroller-based lock-in amplifier for sub-milliohm resistance measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, 83, 075103 (2012).
- [14] P. Kumbhare, N. Sarwade et al., "Implementation of Lock in Amplifier (LIA) for very low signal measurements", *Int. J. of Electr. and Comp. Eng.*, 1, issue 4. (online) (2015).
- [15] National Instruments Hungary Kft. honlap, <http://www.ni.com/hu-hu/shop/labview.html>,
Letöltés ideje : 2017.08.07.
- [16] Sánta Imre, "Optoelektronika", A Digitalis Tankönyvtárba 2013-ban feltöltött egyetemi jegyzet. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0025_fiz_8/ch03s03.html,
Letöltés ideje : 2017.08.07.
- [17] U. Titze, Ch. Shenk, "Analóg és digitális áramkörök", Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (1990), 25. fejezet.
- [18] Z. Bay, "Reflection of microwaves from the Moon" *Hungarica Acta Physica* (1947) 1: 1. doi:10.1007/BF03161123
- [19] Bay Zoltán, "Válogatott tanulmányok", Gondolat Kiadó, Budapest (1988)
- [20] "What is a Lock-In Amplifier", PerkinElmer nstruments, Technical note, TN 1000,
Letöltés ideje : 2017.08.07.
- [21] "Principles of lock-in detecton and the state of the art", Zurich Instruments, White Paper (2016)., <https://www.zhinst.com/applications/principles-of-lock-in-detection>
Letöltés ideje : 2017.08.07.
- [22] USB-6002 Multifunction I/O Device, National Instruments Hungary Kft., <http://www.ni.com/hu-hu/support/model.usb-6002.html>,
Letöltés ideje : 2017.08.07.