

Magyar nyelvű folyóiratcikkek

[Csörnyei,2003g] **Csörnyei M.**: „Mikrocsiplézerek intenzitás zajának csökkentése”, *Híradástechnika* 2003/1 Január, vol.LVIII., pp.17-20. L R

Hivatkozási lista

Hivatkozott cikkek:

M.Csörnyei, T.Berceli, T.Bánky: „Microchip laser RIN suppression for fiber radio applications”, *URSI 2002, XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands, August 14-17, 2002, No.1848.

M.Csörnyei, T.Berceli, P.R.Herczföld: „Noise suppression of Nd:YVO4 solid-state lasers for telecommunication applications”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 12, December 2003, pp.2983-2988. L R

Hivatkozás helye:

S. Valling, B. Ståhlberga, Å.M. Lindberg: „Tunable feedback loop for suppression of relaxation oscillations in a diode-pumped Nd:YVO4 laser”, *Optics & Laser Technology*, vol. 39, Issue 1, February 2007, pp. 82-85.

Szöveggörnyezet: „Suppression results around 25–30 dB are demonstrated in the RO frequency range of 500 kHz to 1.5 MHz. These results are comparable to those presented in [4], [5], [6], [7], [8], [9] and [10] in the 100–350 kHz region. ”

Bibliográfia a tézisjegyzékhez

[Arecchi,1982] F.T. Arecchi, R. Meucci, G. Puccioni, J. Tredicce: „Experimental Evidence of Subharmonic Bifurcations, Multistability, and Turbulence in a Q-Switched Gas Laser”, *Physical Review Letters*, vol. 49, No. 17, October 1982, pp. 1217-1220.

[Armstrong,1966] J. A. Armstrong, “Theory of Interferometric Analysis of Laser Phase Noise”, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 56, No. 8, August 1966, pp. 1024-1031.

[Capmany,2000] J. Capmany, “Fiber-Optic Filters for RF Signal Processing”, *Proc. OMW2000 Summer School*, Autrans, Franciaország, 2000. Szeptember.

[Gleick,1999] J. Gleick: „Káosz Egy új tudomány születése”, *Göncöl Kiadó*, Budapest, 1999, ISBN 963 9183 07 5

[Klische,1984] W. Klische, H.R. Telle, C.O. Weiss: „Chaos in a solid-tate laser with a periodically modulated pump”, *Optics Letters*, Vol. 9. No. 12. December 1984, pp. 561-563.

[Luo,1998] L. Luo, T.J. Tee, P.L. Chu, “Chaotic behavior in erbium-doped fiber-ring lasers”, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 15, No. 3, March 1998, pp. 972-978.

[Moslehi,1986] B. Moslehi, „Analysis of optical phase noise in fiber-optic systems employing a laser source with arbitrary coherence time”, *J. of Lightw. Techn.*, vol.4, No.9,1986,pp. 1334-51.

[Tél,2002] Tél Tamás, Gruiz Márton: „Kaotikus dinamika”, *Nemzeti Tankönyvkiadó*, Budapest, 2002, ISBN 963 19 3280 X

Távközlési lézerek zajcsökkentési eredményei

doktori értekezés tézisjegyzéke

Csörnyei Márk

Témavezető: Dr. Berceli Tibor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

2008.

Az értekezés tárgya és célkitűzése

Doktori értekezésem témája a híradástechnikai célú félvezető és szilárdtestlézerek esetében alkalmazható intenzitás zaj csökkentési módszerek vizsgálata, illetve az ehhez kapcsolódó új kutatási eredményeim bemutatása.

Elsősorban rövid távú üvegszálas összeköttetések, így helyi illetve városi hálózatok, valamint optikai-mobil rendszerek esetén a lézerek relatív intenzitás zaja az átvitel legjelentősebb zajforrása, mely a kis csatorna csillapítás miatt a fotodetektor termikus zaját fölülmúlva az eredő jel-zaj viszony és így az átviteli minőség egyik legfontosabb meghatározója. Ennek fényében természetes tehát, hogy igen fontos a lézerek intenzitás zajának minimalizálása, valamint a zajcsökkentő eljárások kutatása. Disszertációmban mind szilárdtestlézer mind pedig félvezető lézer esetére megvizsgálom az alkalmazható lehetőségeket és a két esetben új tervezési eljárást, illetve új zajcsökkentési módszert javaslok.

Eredményeimet három tézis csoportba foglaltam össze. Az első tézis csoport Nd:YVO₄ szilárdtestlézer optoelektronikus visszacsatolással történő zajelnyomását, illetve annak hatásait tárgyalja.

A második tézis csoportban aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométerek intenzitás zajra kifejtett hatását vizsgálom. Megmutatom továbbá, hogy az ilyen struktúrák optikai zajcsökkentés során is bevetethetők.

A harmadik tézis csoportban kettőnél több késleltetésű rendszerek közül legegyszerűbb esetként háromkarú transzverzális szűrőt tekintve igazolom, hogy a fáziszaj intenzitás zajba történő átalakulása bizonyos frekvenciákon kisebb mértékű mint kétkarú interferométer esetén, így támasztva alá, hogy transzverzális szűrő használatával tovább javítható a zajcsökkentés mértéke.

Alkalmazott kísérleti és vizsgálati módszerek

Az értekezés a bevezetésben leírtaknak megfelelően távközlési lézerek zajcsökkentési módszereit tárgyalja. A disszertációban alkalmazott vizsgálati módszerek:

- lineáris és nemlineáris hálózatok vizsgálata
- áramkörök modellezése, számítógépes hálózat analízis
- nemlineáris differenciálegyenlet-rendszerek megoldása munkaponti linearizálással, ill. numerikus úton
- kaotikus rendszerek vizsgálata

[Csörnyei,2004c] T.Berceli, **M.Csörnyei**, T.Bánky, T.Marozsák, E.Udvary, G.Járó, A.Hilt: „Improvements in Radio over Fiber Systems for Mobile Networks”, *IEEE Radio & Wireless Conference, RAWCON 2004*, Workshop paper: Front End Opto-Electronics for Future Radio Communications, Atlanta, USA, September 20, 2004.

[Csörnyei,2005c] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Fiber-delay lines for laser noise cancellation”, *PWCom 2005 12th Nefertiti Workshop “Photonics in Wireless Communication: Cost-Effective Solutions and Future Technologies”*, Säröhus, Göteborg, Sweden 1-3 June, 2005.

[Csörnyei,2005d] Pfrommer, H., M.A.Piqueras, A.Martinez, V.Polo, J.Marti, F.Van Dijk, N.Vojdani, C.P.Liu, A.Seeds, Y.Guillerme, J.Y.Daden, T.Berceli, **M.Csörnyei**, G.Ijjas, S.Carlsson, J.L.Picó, J.M.Marin, E.Gómez, IST-GANDALF: „Gbit/s Access Network using optical remote delivery optical feeder for heterogeneous broadband wireless and wireline nodes”, *European Conference on Networks and Optical Communications (NOC 2005)*, London, UK, 5-7 July 2005 (invited), ISBN: 0-9538863-8-7, pp. 328-335. L

[Csörnyei,2005e] **M.Csörnyei**: „New All-Optical Intensity Noise Suppression of Nd:YVO₄ Solid-State Lasers for Optical Generation of Microwaves”, *Broadband Europe Conference*, Bordeaux, France, 12-14 December, 2005. Elektronikus közlemény, URL: <http://www.bbeurope.org/>

[Csörnyei,2006a] Sz. Kelemen., Z.Horváth, **M.Csörnyei**, T.Bánky, T.Berceli: „Optical-wireless indoor sensor network for home and building monitoring”, *1st ISIS Workshop „Emerging Optical Millimeter-Wave and Terahertz Technologies”*, Boppard am Rhein, Germany, May 31-June 1, 2006. Elektronikus közlemény, URL: <http://www.ist-isis.org/index/Draft%20papers.html>

[Csörnyei,2006b] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Phase-to-Intensity noise conversion in optical noise filtering”, *ICTON2006, 8th International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 1., Nottingham, United Kingdom, June 18-22, 2006., pp. 191-194. L

[Csörnyei,2007a] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Phase-to-Intensity Noise Conversion in Optical-Microwave Filters”, *12th Microcoll*, 14-16 May 2007, Budapest, Hungary, pp. 93-96.

[Csörnyei,2007b] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Chaotic Oscillations in Noise Suppressed Nd:YVO₄ Solid State Laser”, *Joint Session 12th Microcoll & Mediterran Microwave Symposium 2007*, 14-16 May 2007, Budapest, Hungary, pp. 167-170.

[Csörnyei,2007c] R.Klinda, V.Bartoss, **M.Csörnyei**, T.Bánky, T.Berceli: „General Purpose Combined Optical-Wireless ZigBee Sensor Networks”, *ICTON2007, 9th International Conference on Transparent Optical Networks*, Rome, Italy, July 1-5, 2007.

[Csörnyei,2007d] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Chaotic Behavior of Noise Suppressed Solid State Lasers used in Radio-over-Fiber Systems”, *MWP2007, 2007 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 3-5 October, 2007, Victoria, BC, Canada, pp. 214-217.

[Csörnyei,2007e] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Noise Conversion in Photonic-Microwave Filters”, *MWP2007, 2007 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 3-5 October, 2007, Victoria, BC, Canada, pp. 218-221.

Technical Report

[Csörnyei,2003f] T. Berceli, I. Frigyes; T.Bánky; **M.Csörnyei**; A. Kovacs: „High Capacity Hybrid Fiber-Optic/Wireless Communications System”, *National Technical Information Service*, URL: <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA411406> R

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadás

[Csörnyei,2000] **M.Csörnyei**, A.Zólmay, B.Klein: „Non-linear behaviour of low noise optical receivers”, *3rd International Summer School, Interactions between Microwaves and Optics, OMW*, Grenoble, France, September 1-5, 2000.

[Csörnyei,2001a] **M.Csörnyei**, B.Klein, T.Berceli: „Measurement and simulation of non-linear microwave amplifiers operating in digital transmission systems”, *Optical/Wireless Workshop in the framework of the European MOIKIT project*, Budapest, Hungary, 12 March 2001.

[Csörnyei,2002a] **M.Csörnyei**, T.Bánky, T.Berceli: „RIN peak suppression for solid state lasers”, *MIKON-2002 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Gdansk, Poland, May 20-22, 2002, pp. 183-186. L R

[Csörnyei,2002c] **M.Csörnyei**, T.Berceli, T.Bánky, T.Marozsák, P.R.Herczföld: „A new approach for RIN peak and phase noise suppression in microchip lasers”, *International Microwave Symposium IMS2002*, Seattle, USA, June 2-7, 2002, pp.1377-80. R

[Csörnyei,2002d] **M.Csörnyei**, T.Berceli, T.Bánky: „Microchip laser RIN suppression for fiber radio applications”, *URSI 2002, XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands, August 14-17, 2002, No.1848.

[Csörnyei,2002e] Berceli, T., **M.Csörnyei**: „Opto-microwave signal processing: Up and down conversion techniques”, *RTO SET Lecture Series on „Optics Microwave Interactions”, RTO-ENP-028*, Jouy en Josas, France, 2-3 September 2002; Duisburg, Germany, 5-6 September 2002; Budapest, Hungary, 9-10 September 2002.

[Csörnyei,2002f] **M.Csörnyei**, T.Berceli, B.Klein: „Nonlinear effects in combined optical-wireless OFDM networks”, *MOST Conference Mobile Open Society through Wireless Telecommunications*, Warsaw, Poland, October 7-8, 2002, pp.26-27.

[Csörnyei,2002g] T.Berceli, **M.Csörnyei**, B.Klein, T.Bánky: „Nonlinear effects in optical-wireless OFDM signal transmission”, *International Topical Meeting on Microwave Photonics MWP2002*, IEICE Electronics Society, Awaji, Japan, November 5-8 2002, pp.225-228. L R

[Csörnyei,2003c] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Rauschunterdrückung in optischen Kommunikationssystemen”, *Frühlingsakademie und Expertentagung 2003, Wissenschaftliche Mitteilungen der 15. Frühlingsakademie*, Hotel Uni, Balatonfüred, Hungary, May 17-23,2003, pp.16-19.

[Csörnyei,2003d] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Nd:YVO4 solid-state lasers for telecommunication applications”, *11th Microcoll conference*, Budapest, Hungary, September 10-11, 2003, pp. 59-62. L

[Csörnyei,2003e] **M.Csörnyei**, T.Berceli, P.R.Herczföld: „Noise analysis and suppression for Nd:YVO4 solid-state lasers”, *International Topical Meeting on Microwave Photonics MWP2003*, Budapest, Hungary, September 10-12, 2003, pp. 231-234. L R

[Csörnyei,2004a] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „New all-optical intensity noise suppression for solid-state lasers”, *2nd European Neferiti Winter School in Microwave Photonics*, York, England, February 3-5, 2004.

[Csörnyei,2004b] **M.Csörnyei**, T.Berceli, T.Marozsák: „All-optical intensity noise suppression of solid-state lasers for optical generation of microwaves”, *15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Warsaw, Poland, May 17-19, 2004. vol. 3, pp.781-784. L R

- lineáris áramkörök zajanalízise
- visszacsatolt rendszerek analízise
- optikai rendszertechnikai elemzés
- könyvtári irodalomkutatás (konferencia kiadványok, szakmai folyóiratok, szakkönyvek), internetes keresők alkalmazása, szakmai adatbázisok kutatása (IEEE Explore stb.)

A kutatás gyakorlati része során alkalmazott kísérleti módszerek:

- számítógépes adatfeldolgozás és megjelenítés
- áramkör tervezés, kivitelezés, vizsgálat
- optikai rendszertervezés
- kis- és nagyfrekvenciás elektromos és optikai mérés technika

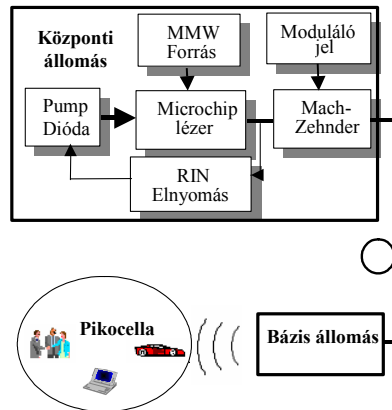
A disszertáció készítése során a felsorolt vizsgálati és kísérleti módszereket az egyes témakörök által igényelt mértékben használtam föl.

Az értekezés új tudományos eredményei

1. téziscsoport: Szilárdtestlézer optoelektronikai visszacsatoláson alapuló zajcsökkentése

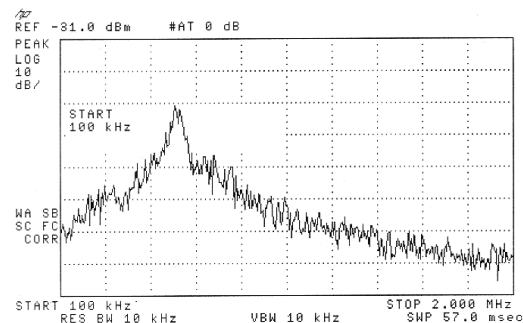
A távközlési felhasználásokban egyre jelentősebb szerepet kap a mikro- ill. milliméteres hullámok optikai előállítására, feldolgozására. Optikai-mobil rendszerekben, a bázisállomások üvegszál technológiával ellátott hálózatba kapcsolása esetén, lehetővé válik a mikrohullámú keverő jelek egy központi állomásról történő optikai továbbítása, és így a bázisállomások (BS) igen drága rendszertechnikai elemének a helyi oszcillátorok elhagyása. Mikrohullámok optikai előállításának egyik lehetséges megoldása több módusú szilárdtestlézerek alkalmazása. A jövő vezeték nélküli hálózatainak várható frekvenciasávjaihoz illesztve használhatunk 20GHz vagy akár 60GHz módustávolságú kristálylézert. A longitudinális módusok távolsága a kristály geometriai méreteiből számolható. Két vagy több módus esetén, a bázisállomásban történő optikai detekció során nyert nagyfrekvenciás jel, oszcillátor jelként közvetlenül felhasználható ill. kisugározható. Azonban a microchip lézerek jó fáziszaj tulajdonságaik mellett jelentős intenzitászajjal rendelkeznek a módusokhoz közeli alacsony frekvenciás tartományban (100kHz-2MHz). Mivel a relaxációs oszcilláción megjelenő intenzitás-zaj 20-40dB-es kiemelése igen zavaró lenne a lézer módusok oszcillátor jelként történő felhasználása során, a zaj elnyomására optoelektronikai szabályzókat vagy egyéb nyílthurkú elnyomást alkalmazhatunk. A fent vázolt

optikai-mikrohullámú rendszer egy lehetséges, egyszerűsített blokkdiagramja az 1.1. ábrán látható.



1.1. ábra Optikailag táplált rádiós vezeték nélküli rendszer

A kristálylézer relaxációs oszcillációs frekvenciáján megjelenő relatív intenzitás zaj növekményt 100mW-os optikai pumpálás esetén a 1.2. ábrán mutatom be.



1.2. ábra A Nd:YVO₄ mikroszip lézer intenzitás zaj csúcsa 100mW-os optikai pumpálás esetén. A relaxációs oszcilláció frekvenciája 500kHz.

A 2. ábrán látható módon a relaxációs rezonancián megjelenő RIN, jelentős (~40dB) kiemeléssel rendelkezik az optikai vevőhöz igen közel. A szabályzó kör tervezése során, a szükséges szimulációk végrehajtásához a lézer átviteli karakterisztikáihoz illeszkedő, megfelelő matematikai modellt kell használnunk. Ennek megalkotásakor fontos szempont volt az egyszerűség, mivel így könnyen átlátható a visszacsatoló rendszer működése, Olyan modellre van tehát szükség, melynek amplitúdó karakterisztikája a relaxációs oszcilláció frekvenciáján, a modell valamely paramétere által szabályzott kiemeléssel rendelkezik, ugyanezen frekvencia közelében majdnem 180° a fázistolása valamint impulzusválasza csillapított szinuszos jel. E feltételek kielégítésére, a szilárdtestlézerek relatív intenzitás zajának

T3/3: Megvizsgáltam az átviteli karakterisztika különböző pontjainak hatását a fáziszaj-intenzitás zaj konverzió szintjére és a várható zajelnyomás minőségére, valamint megmagyaráztam mind Mach-Zehnder interferométer mind pedig három képlettel FIR szűrő esetére a kimeneten megjelenő intenzitás zaj kialakulásának folyamatát. Az összehasonlító vizsgálatok során kapott eredményeim zajcsökkentési célú szűrőstruktúrák tervezéséhez nyújtanak közvetlen segítséget. Jellemeztem a három képlettel véges impulzusválaszú szűrő koherens átviteli karakterisztikájának jellegzetes pontjait fáziszaj-intenzitás zaj konverzió szempontjából, mely alapján tervezési útmutatót állítottam össze. ([Csörnyei, 2007e])

Az eredmények hasznosítása

Az értekezés eredményei tudományos közlemények, folyóiratcikkek és nemzetközi konferenciákon tartott előadások formájában kerültek publikálásra, valamint részben átkerültek az oktatási anyagba, önálló laboratóriumi feladatok és diplomatervek formájában. Munkámra az elmúlt évek során két független tudományos hivatkozást kaptam.

A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

Cikk szerkesztett könyvben

[Csörnyei,2003a] **M.Csörnyei**, T.Berceli, B.Klein: „Technology for mobile society”, Editor: M. Muraszkievicz, *MOST Mobile Open Society through Wireless Telecommunications press*, January, 2003. pp. 180-187. L

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikkek

[Csörnyei,2003b] **M.Csörnyei**, T.Berceli, P.R.Herczfeld: „Noise suppression of Nd:YVO₄ solid-state lasers for telecommunication applications”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 12, December 2003, pp.2983-2988. L R IF2.01

[Csörnyei,2005a] **M.Csörnyei**, T.Berceli, T.Marozsák: „All-optical intensity noise suppression for solid-state and semiconductor lasers”, *Journal of Telecommunications and Information Technology, Mikon 2004 young authors special issue*, 2/2005, pp.65-70. L R

Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikkek

[Csörnyei,2005b] **M.Csörnyei**, T.Berceli: „Fiber-delay lines for intensity noise suppression in optical links”, *Híradástechnika, Selected Papers*, vol. LX, 2005/6, pp.39-43. L R

[Csörnyei,2005f] **M.Csörnyei**, Berceli T.: „Optikai-mikrohullámú szűrés fénytávközlő rendszerek intenzitás zajának csökkentésére”, *Híradástechnika*, vol. LX, 2005/2, pp.13-17.L R

[Csörnyei,2002b] Udvary, E., **M.Csörnyei**, G.Maury, Y.Le Guennec: „SOAs in subcarrier multiplexed optical networks”, *MIKON-2002 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Gdansk, Poland, May 20-22, 2002, pp. 874-877. L R

Az eddig vizsgálatokból tehát kiderült, hogy amint azt a korábbi fejezetben kiszámítottam keskeny vonalszélességű lézerek esetén koherens üzemmódban igen jelentős zajcsökkentés érhető el, azonban ügyelni kell, hogy a zajcsökkentésnek alávetendő lézer vivőfrekvenciája az interferométer átviteli karakterisztikájának mely szakaszára esik. A maximum helyen (out-of-quadrature) egyenletes lefutású konverziót kaptam (3.4. ábra), azonban ha a vivőfrekvencia a kvadratura pontra esik, a hirtelen és jelentősen megnövekedő konverziós eredetű intenzitás zaj a zajcsökkentést lehetetlenné teszi.

Hasonló vizsgálatokat végeztem a három késleltetős transzverzális szűrő mint koherens zajcsökkentő struktúra esetén is, és a fentiekhez igen hasonló eredményt tapasztaltam, vagyis hogy a 3dB-es csillapítású pont kivételével a struktúra alkalmas félvezető lézerek intenzitás zajának csökkentésére.

Elsőként vizsgáltam optikai-mikrohullámú szűrőstruktúrák fáziszaj-intenzitás zaj konverzióját zajcsökkentési alkalmazások szempontjából. További fontos, új eredményként megmagyaráztam a fent bemutatott jelenség okát, miszerint koherens esetben az optikai vivő átviteli függvényen való elhelyezkedésétől függő különböző konverziós karakterisztikák oka az átviteli függvény lézer vivőre vonatkoztatott szimmetriájában keresendő.

Az összehasonlító vizsgálatok során kapott eredményeimet a 3.1. Táblázatban foglaltam össze, mely könnyen használható és áttekinthető tervezési segédeszköz jelent zajcsökkentő interferometriai rendszerek létrehozása során.

3.1. Táblázat

	Koherens	Inkoherens
UMZI maximum pont	Keskenysávú periódikus zajjelnyomás (DFB, FP)	Keskenysávú periódikus zajjelnyomás (FP)
UMZI minimum pont	x	x
UMZI 3dB-es pont	x	x
FIR maximum pont	Szélesebb elnyomási sávok (DFB, FP)	Szélesebb elnyomási sávok (FP)
FIR minimum pont	x	x
FIR 3dB-es pont	x	x
FIR lokális maximum	Szélesebb elnyomási sávok (DFB, FP). Egyaránt csökken a jel és a zaj teljesítménye is. S/N értéke megegyezik a maximum pont esetével. A maximum pont esetéhez képest más frekvenciákon működik, így annak alternatívája.	x

A táblázatban x betűvel jelöltem meg azokat párosításokat melyek nem fordulhatnak elő (pl. inkoherens esetben nem választhatók ki tetszőlegesen az átviteli karakterisztika pontjai, így a lokális maximum, 3dB-es pont, stb.), vagy alkalmazásuk a túl nagy zajkonverzió vagy a vivő eltűnése miatt nem javasolt.

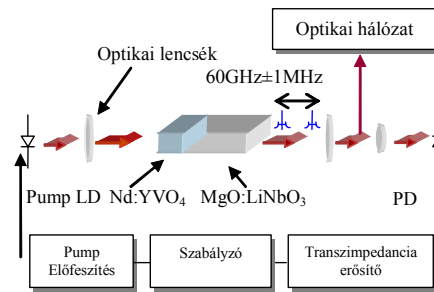
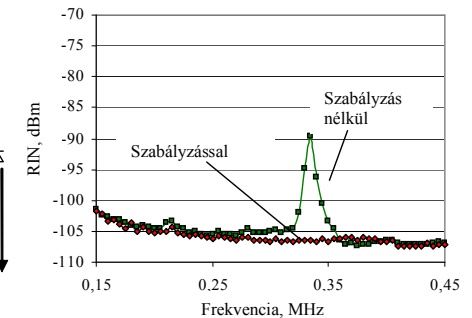
Eredményeimet a következő altézisben foglaltam össze:

modellezésére, egyszerű, kétidőállandós erősítő tagot választottam. A kétidőállandós erősítő átviteli függvényét (1.3.1) mutatja, ahol A_0 a frekvenciafüggetlen átvitel, ω_{f1} és ω_{f2} pedig az időállandók reciprokaként adódó törésponti körfrekvenciákat jelentik.

$$G(s) = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{f1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{f2}}\right)}$$

T1/1: Új, egyszerű zajmodellt dolgoztam ki szilárdtestlézerek optoelektronikai visszacsatolással történő zajcsökkentésének tervezéséhez. A modell segítségével végrehajtott számítógépes szimulációk és szabályzástechnikai számítások alapján, könnyen meghatározhatók az optoelektronikai visszacsatolás különböző blokkjai, illetve azok elemértékei. ([Csörnyei, 2002a] [Csörnyei, 2002c], [Csörnyei, 2003b])

Az új zajmodell segítségével a 1.3. ábrán látható optoelektronikai struktúrát terveztem, melynek segítségével a 1.4. ábrán bemutatott zajcsökkentés volt elérhető.

1.3. ábra Kétmódusú Nd:YVO₄ lézerekristályt használó optikai adó elvi rajza.1.4. ábra Nd:YVO₄ relaxációs oszcillációján megvalósított zajcsökkentés.

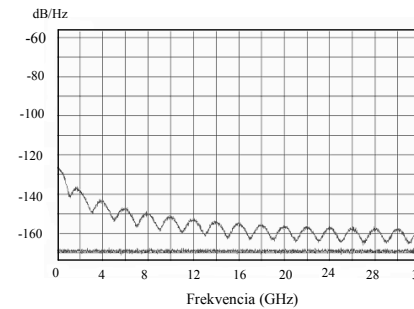
T1/2: A zajmodell jelentette módszer általánosított alkalmazhatóságának ellenőrzése érdekében optoelektronikai szabályzókat terveztem Nd:YVO₄ szilárdtestlézer intenzitás zajának csökkentésére, majd kísérleti vizsgálatokkal igazoltam annak működését. Méréssel ellenőriztem a zajcsökkentés mértékét és 17dB-es elnyomást tapasztaltam a lézer relaxációs oszcillációs frekvenciáján. A zajcsökkentési eredmény lehetővé teszi a Nd:YVO₄ szilárdtestlézer optikai-mobil rendszerben való felhasználását. ([Csörnyei, 2002a] [Csörnyei, 2002c], [Csörnyei, 2003b])

A zajcsökkentő rendszer tervezéséhez használt fenti lézermódel paramétereinek pontos meghatározásához megoldottam a Nd:YVO₄ szilárdtestlézer sebesség egyenlet rendszerét a munkaponti linearizálás módszerével. Az autonom rendszer megoldásával meghatároztam továbbá a lézert leíró nemlineáris differenciálegyenlet-rendszer megoldásainak stabilitási feltételeit, mely elengedhetetlen a későbbi dinamikus vizsgálatok elvégzéséhez.

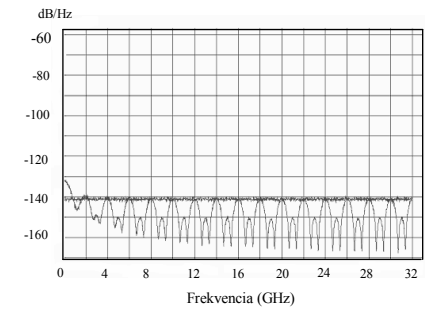
A T1/3: altézisben bevezetett zajmodell paramétereinek meghatározása végett, valamint a modell pontossága verifikálásához a munkaponti linearizálás módszerével megoldottam a Nd:YVO₄ szilárdtestlézer autonóm nemlineáris differenciálegyenlet-rendszerként leírható sebesség-egyenleteit. Az eredményekből meghatároztam a relaxációs oszcilláció frekvenciáját, csillapítását és időfüggvényét melyek igazolták az általam használt modell pontosságát. Az egyenletrendszer megoldásával meghatároztam továbbá a lézerműködés stabilitásának feltételeit Nd:YVO₄ esetére, melyek a lézer dinamikus tulajdonságainak későbbi vizsgálati során fontos kezdeti információkkal szolgáltak. ([Csörnyei, 2003g])

Az optoelektronikai visszacsatolás elvén működő zajcsökkentés működési határainak egzakt meghatározásához a visszacsatoló kör fotodiódája által detektált és erősített rezonanciát a pumpáló lézer moduláló jelének tekintem. Ilyen értelemben, kis modulációs mélység esetén a korábbiakban látottak alapján megfelelő tervezés esetén a relaxációs oszcilláció frekvenciáján kioltás történik. Vizsgálatom célja ezúttal az volt, hogy meghatározzam nagyobb modulációs mélységek esetén hogyan változik a rendszer működése. Ennek érdekében a korábban már tárgyalt, a lézer működését leíró sebesség egyenlet rendszert kiegészítettem a visszacsatolt zaj jel okozta pumpálás moduláció összetevőjével. Az így időfüggővé vált, nemautonóm, nemlineáris differenciálegyenlet-rendszert ezután különböző optikai pumpálási arányok és visszacsatolt jelszintek esetére numerikusan oldottam meg, annak érdekében, hogy feltérképezhessem a lézer dinamikus viselkedését. A numerikus számítások első eredményeként, a visszacsatolás nélküli lézer esetére visszakaptam a foton-sűrűsége és inverziósűrűsége a munkaponti linearizálás módszerével kapott eredményeket, melyeket az 1.5-1.6. ábrákon mutatok be. Ekkor tehát látható, hogy a lézer a relaxációs oszcilláció frekvenciájával jellemezhető tranzienst követően közel konstans foton- és inverziósűrűséggel működik. A megoldás fázistérben történő ábrázolása (1.7. ábra) alapján kijelenthetjük, hogy a lézer bekapcsolt állapota stabil fókuszpont.

A visszacsatolt jel amplitúdóját növelve a 1.8-1.12. ábrákon látható módon az egyenletrendszer megoldása előbb határciklus, majd periódus-kettőző bifurkációs sorozatán kaotikus állapotba megy át.



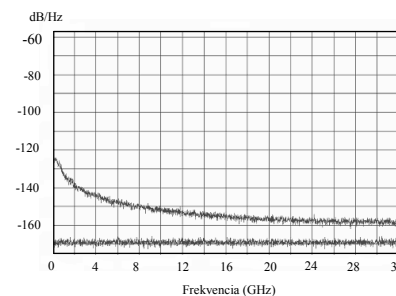
3.2. ábra Fáziszaj eredetű kimeneti intenzitás-zaj 2MHz vonalszélességű lézerral megvilágított 0,5ns késleltetésű három karú optikai-mikrohullámú szűrő esetén. (RIN=-170dB/Hz)



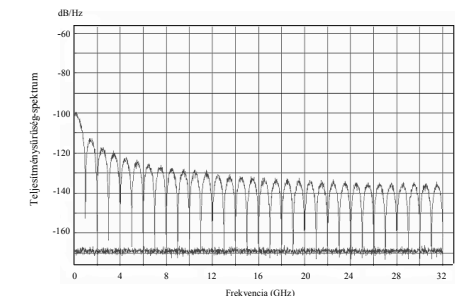
3.3. ábra Három ágú FIR szűrővel elérhető intenzitás-zaj csökkentés. 3GHz fölött a fáziszajból kialakuló intenzitás-zaj szintje kisebb a lézer eredeti -140dB/Hz-es zaj szintjénél, és így itt periódikus zajcsökkentés érhető el. (vonalszélesség: 2MHz)

T3/2: A működési feltételek optimalizálása érdekében, megvizsgáltam a struktúra fáziszaj-intenzitás-zaj konverzióját, kizárólag fáziszajt tartalmazó bemeneti jel esetén. Számításaimmal igazoltam, hogy a fáziszaj-intenzitás-zaj konverzió ellenére, a több elemes optikai-mikrohullámú szűrők kiváló lehetőséget biztosítanak a zajcsökkentés terén, segítségükkel 10dB-es zajcsökkentés érhető el. ([Csörnyei, 2007e])

Koherens transzverzális optikai szűrők esetén az intenzitás-zaj kimeneti spektrális sűrűségfüggvénye igen nagy mértékben függ attól, hogy az optikai vivőfrekvencia az átviteli karakterisztika mely szakaszára esik. Ennek alapján beszélhetünk különböző munkapontokról. Tekintsük először a korábbi példákban már többször szerepelt 1ns késleltetésű kétkarú interferométert. Az átviteli karakterisztika maximumára illetve a 3dB-es kvadratura pontra helyezett optikai vivő esetén a szimulált fáziszaj-intenzitás-zaj konverziót a 3.4. és 3.5. ábrákon láthatjuk.



3.4. ábra Az UMZI átvitelének maximumára helyezett vivő esetén kialakuló zajkonverzió.

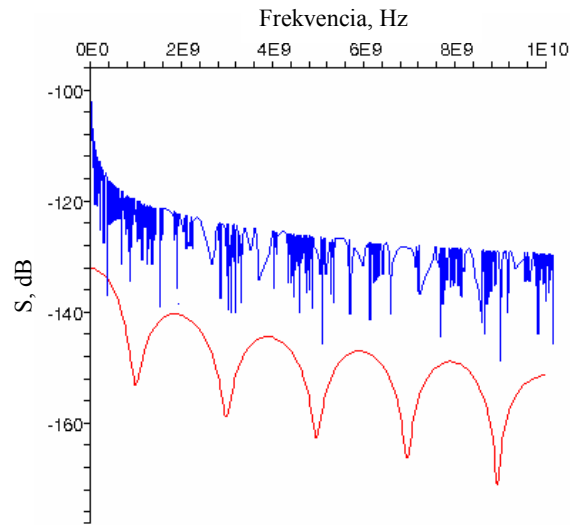


3.5. ábra Az UMZI átvitelének kvadratura pontjára helyezett vivő esetén kialakuló zajkonverzió.

kell a szűrő fáziszaj-intenzitás zaj konverziós képességét, hogy az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer esetéhez hasonlóan, elkerülhető legyen az az eset amikor a zajcsökkentő struktúra, helytelen tervezés következtében, csökkentés helyett a kimeneti zaj növekedését okozza.

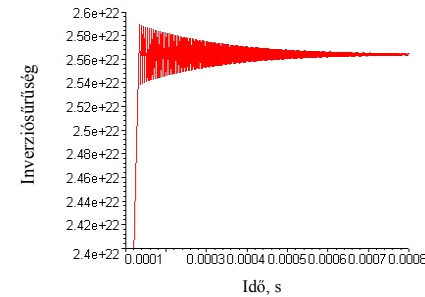
T3/1: Véges impulzusválaszú optikai-mikrohullámú szűrőstruktúrákat javasoltam félvezető lézerek relatív intenzitás zajának csökkentésére, illetve az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométerrel elérhető zajcsökkentés sávszélességének növelésére. ([Csörnyei, 2005a])

A második téiscsoportban irtetett módszert kiterjesztve ezúttal három késleltetős egyszerű véges impulzusválaszú (FIR) optikai-mikrohullámú szűrő esetére határoztam meg elsőként a fáziszaj-intenzitás zaj konverzió értékét zárt formában, annak érdekében, hogy használható megoldás álljon rendelkezésre ilyen struktúrák zajcsökkentési célú méretezéséhez. A fáziszajjal terhelt bemeneti jel hatására a kimeneten megjelenő késleltetett jelösszeg autokorrelációs függvényének Fourier transzformációját meghatározva kaptam meg a kimeneti teljesítménysűrűséget. A fáziszaj-intenzitás zaj konverzió számított eredményét három késleltetős FIR szűrőre koherens ($\tau=0,5\text{ns}$) és inkoherens ($\tau=0,5\mu\text{s}$) esetben a 3.1.ábrán mutatom be.

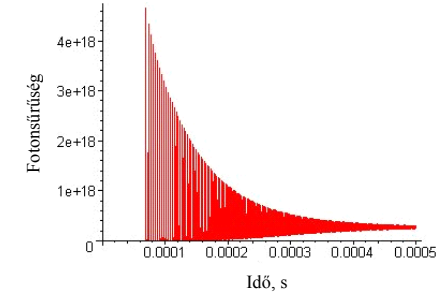


3.1. ábra Fáziszajjal terhelt bemenő jellel meghajtott háromkaru transzverzális optikai-mikrohullámú szűrő (a különböző jelútak súlyozása azonos) kimenetén kapható intenzitás zaj spektrális sűrűségfüggvénye. A felső (kék) görbe mutatja az inkoherens ($\tau=0,5\mu\text{s}$) , míg az alsó (piros) görbe a koherens ($\tau=0,5\text{ns}$) esetben kapható konverziót.

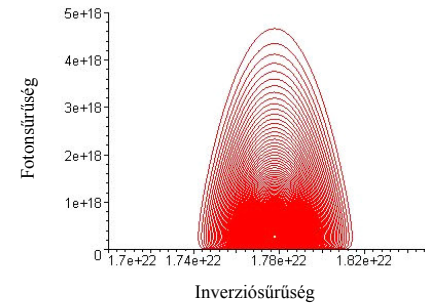
Számításaimat VPIphotonics™ optikai szimulátor programmal végzett szimulációk segítségével ellenőriztem. A három késleltetős optikai-mikrohullámú transzverzális szűrő által létrehozott fáziszaj-intenzitás zaj konverzió, valamint a megvalósítható zajcsökkentés a 3.2 és 3.3. ábrákon látható.



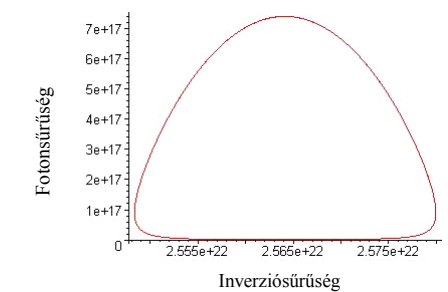
1.5. ábra Numerikus megoldás az inverziósűrűség bekapcsolási változására (pumpálási arány: $W=0,7$).



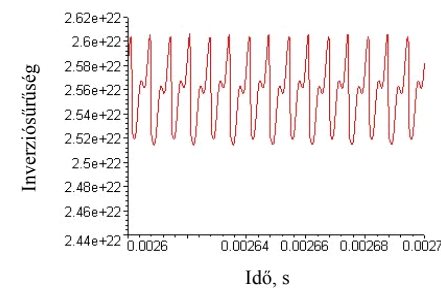
1.6. ábra Numerikus megoldás a foton-sűrűség bekapcsolási változására (pumpálási arány: $W=0,7$).



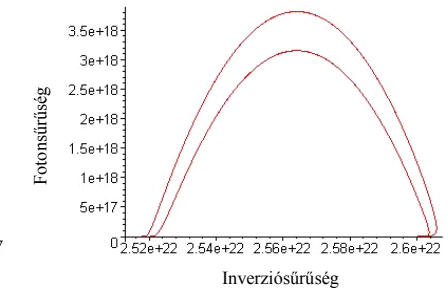
1.7. ábra Időfüggetlen gerjesztés nélküli egyenletrendszer bekapcsolt állapothoz tartozó megoldása a fókuszpont környezetében. Számítási időtartomány: $0..0,009\text{s}$.



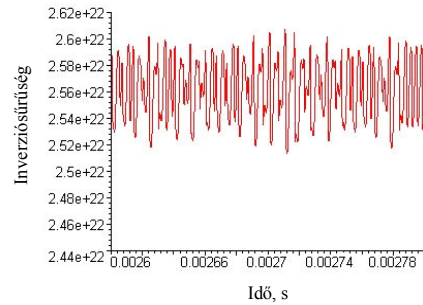
1.8. ábra Időfüggetlen, nemautonóm rendszer megoldása $m=25\%$ -os visszacsatolási modulációs mélység esetén. A fázisportrén határciklus látható.



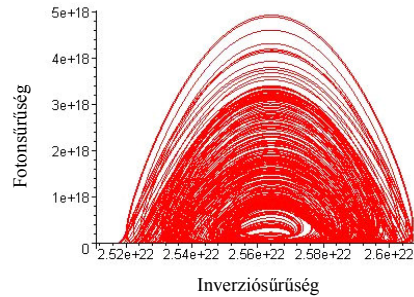
1.9. ábra Időfüggetlen rendszer megoldása az inverziósűrűsége 35% -os visszacsatolási modulációs mélység esetén. Hasonló perióduskettőző bifurkáció kapható a foton-sűrűsége is. (1.10. ábra)



1.10. ábra Időfüggetlen, nemautonóm rendszer megoldása 35% -os visszacsatolási modulációs mélység esetén. A fázisportrén az első perióduskettőző bifurkáció látható.



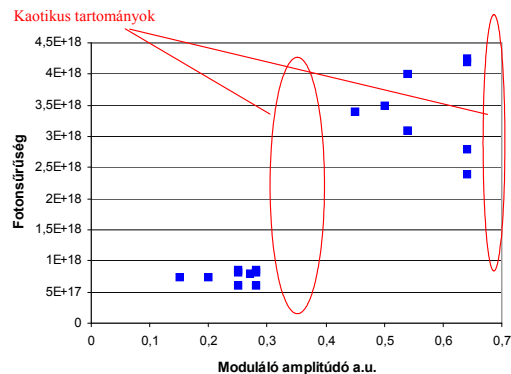
1.11. ábra Az inverziósűrűség kaotikus menete $m=94\%$ esetén.



1.12. ábra Fázisportré a 94%-os modulációs mélység esetén kialakuló kaotikus megoldásról.

T1/4: Felismertem és igazoltam, hogy a szilárdtestlézerek zajcsökkentésére tervezhető optoelektronikai visszacsatolás, mint pumpáló jel moduláció jelentősen befolyásolja a lézer dinamikus viselkedését. Ennek keretében Nd:YVO₄ esetében numerikusan megoldottam a pumpáló jel modulációja által gerjesztett nemautonóm, nemlienáris differenciálegyenlet-rendszerként leírható sebesség-egyenleteket. Az egyenletrendszer különböző visszacsatolás erősségekre történő megoldásával meghatároztam az inverziósűrűség és foton-sűrűség kaotikus viselkedéshez vezető bifurkációs sorozatát. A perióduskettőző bifurkációk számos esetét, illetve a kaotikus eredményt is mind időtartományban mind pedig fázisportrén ábrázoltam. ([Csörnyei, 2007b], [Csörnyei, 2007d])

A foton-sűrűség vagy az inverziósűrűség amplitúdóértékeit a pumpalézer moduláló amplitúdójának függvényében ábrázolva, a klasszikus [Gleick, 1999] villás szerkezetű bifurkációs diagramot kaptam, melyet az 1.13. ábrán mutatok be.



1.13. ábra Nd:YVO₄ lézer bifurkációs diagramja, 0,7-es optikai pumpálás esetén, a pumpamoduláció amplitúdójának függvényében.

T2/2: Általánosan használható felső becslést adtam Fabry-Perot és DFB lézerekre, különböző vonalszélességek esetén a zajcsökkentésre használható interferométer késleltetési időkülönbségére. ([Csörnyei, 2007a])

Optikai-mikrohullámú interferométer vagy szűrő zajcsökkentési célra történő tervezése során, további megfontolást igényel, amennyiben van döntési lehetőség, hogy koherens vagy inkoherens struktúrát alkalmazzunk-e. Az inkoherens rendszer megvalósítása és üzemeltetése robusztussága miatt egyszerűbb, azonban nem minden esetben nyílik lehetőség az általa felkínált egyszerűbb megoldás választására. A koherens és inkoherens működési módok között a lézer vonalszélességével fordítottan arányos koherencia idő és az interferométer τ késleltetési időkülönbsége között fennálló arány dönt. Irodalmi hivatkozások [Armstrong, 1966], [Moslehi, 1986], [Capmany, 2000], valamint eddigi számítási eredményeim alapján egyértelmű, hogy inkoherens esetben, bár a megvalósítás egyszerűbb, a fáziszaj-intenzitás zaj konverzió sokkal (20-30dB) jelentősebb a koherens rendszerben megfigyelhető értéknél.

E legutóbbi megfontolások alapján általános kijelentés tehető a különböző lézertípusok zajcsökkentő rendszereinek koherencia viszonyaira.

Először megállapítható tehát, hogy DFB lézerek esetén, azok tipikusan viszonylag alacsony relatív intenzitás zaja ($<-135\text{dB/Hz}$) miatt kizárólag koherens zajcsökkentő rendszer használható. Ellenkező esetben a zajcsökkentésre szánt rendszer által bevitt zaj további zajnövekményt okoz, és a kívánt javító hatás helyett romlás következik be.

Fabry-Perot lézerdiodák esetében azonban a relaxációs oszcilláció környezetében mérhető tipikusan viszonylag magas RIN érték ($<-110\text{dB/Hz}$) miatt mind koherens mind pedig inkoherens, vagy az inkoherencia határán működő struktúrával zajcsökkentés érhető el.

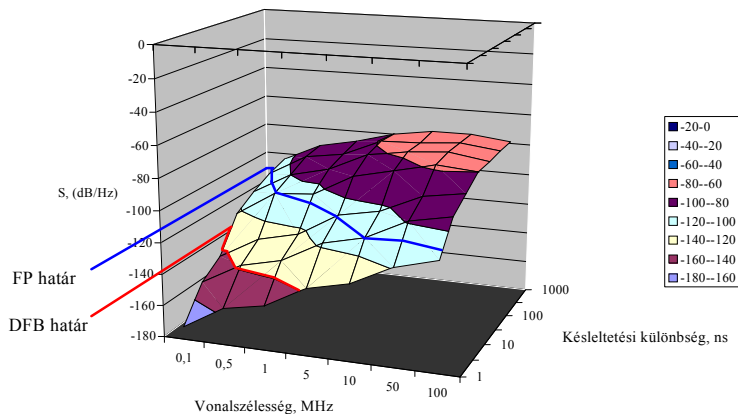
T2/3: A számítógépes szimulációs és mérési eredményekkel alátámasztott számításaim alapján felismertem, hogy DFB lézerek esetén kizárólag koherens rendszer alkalmazható zajcsökkentési célra, míg Fabry-Perot lézerdiodák használatakor tervezési megfontolás kérdése a koherens vagy inkoherens megoldás választása. ([Csörnyei, 2007a])

3. téziscsoport: Félvezető lézerek relatív intenzitászajának csökkentése transzverzális optikai szűrők segítségével

Ebben a téziscsoportban új elgondolásként optikai transzverzális szűrőket javasolok UMZI helyett zajcsökkentésre. A működőképesség alátámasztására ebben az esetben is szükséges a fáziszaj-intenzitás zaj konverzió számításal történő jellemzése, majd pedig a zajcsökkentés mértékének bemutatása. Annak érdekében tehát, hogy transzverzális szűrőt használhassak intenzitás zaj csökkentésre, ismerni

T2/1: Kísérleti vizsgálatokkal igazoltam, hogy az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer alkalmas félvezető lézerek relatív intenzitás zajának csökkentésére, és így egyszerű megoldást jelent rövid távú, segédvívó multiplexált fénytávközlő rendszerek zajának csökkentésére. A működési feltételek optimalizálása érdekében, megvizsgáltam a struktúra fáziszaj-intenzitás zaj konverzióját, fáziszajt és fehér amplitúdó zaj eredetű intenzitás zajt egyaránt tartalmazó bemeneti jelet feltételezve. A számítások eredményeként zárt formában meghatároztam az interferométer kimeneti jelének teljesítménysűrűség-spektrumát, melyben elkülöníthetők a bemenő jel fáziszajából illetve intenzitás zajából átalakult összetevők. A számításokat számítógépes szimulációs eljárással és megvalósított zajcsökkentő struktúrán mért eredmények bemutatásával egészítettem ki és támasztottam alá. Megmutattam továbbá, hogy sávhatárolt fehér amplitúdó zaj eredetű intenzitás zajjal terhelt bemeneti jel esetében a kimeneten számítható intenzitás zaj visszavezethető a fehér zaj esetére zárt alakban levezetett összefüggésre. ([Csörnyei, 2005b], [Csörnyei, 2005f], [Csörnyei, 2006b], [Csörnyei, 2007a])

A 2/1 altézis eredményeit felhasználva kiszámítottam a gyakorlatban előforduló lézer vonalszélességek és interferométer késleltetési idő-különbségek számos kombinációjára az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer (UMZI) kimenetén az optikai vívó frekvenciájára eső fáziszaj eredetű intenzitás zaj konverzió értékét. Ezeket az adatokat a két lézertípus esetén tipikusnak mondható relatív intenzitás zaj (RIN) értékekkel összehasonlítva felső becslést adtam az adott lézer típusokhoz zajcsökkentési céllal tervezhető UMZI alapú zajcsökkentő struktúra késleltetési idő-késleltetésére. A különböző vonalszélesség és késleltetés különbség párokra meghatározott kimeneti zajszinteket a 2.6. ábrán mutatom be.



2.6. ábra A lézer fáziszajából a UMZI kimenetén megjelenő intenzitás zaj szintje különböző vonalszélességek és késleltetési különbségek esetén, az optikai vívótól számított 0 Hz frekvencián. Bejelöltem a legerjedtebb FP és DFB lézerekre jellemző RIN szinteket (RIN_{FP} ≈ -110 dB/Hz, RIN_{DFB} ≈ -140 dB/Hz). Tipikus RIN értékek esetén a határvonalaktól balra biztosan lehetséges zajcsökkentés.

Számítógépes kísérletezésemből egyértelműen kiderült, hogy az egyenletrendszer bizonyos paramétereit változtatva a megoldásfüggvények perióduskettőző bifurkációkon mennek keresztül, mígnem előre teljesen megjósolhatatlan módon változó jelet adnak. Az említett bifurkációkat mind közvetlenül a megoldások időbeli alakulásában, mind pedig azok fázisportréján egyértelműen azonosítottam. Az irodalomban [Tél, 2002], [Gleick, 1999] közismert tény, hogy a bifurkáció sorozat az egyik lehetséges utat jelenti a káosz felé. Az általam kaotikusnak elfogadott állapot teljesen megfelel a fent hivatkozott irodalomban található hasonló ábrázolásoknak, az időfüggvényben semmiféle periodicitás nem található, maga a jel nem előrejelezhető, illetve a fázissíkon ábrázolva a zajjal ellentétben minden esetben az attraktor által körülhatárolt területen belül marad a trajektória. Mindezen ismeretek birtokában, kellően alátámasztottnak látom a „kaotikus viselkedés” kifejezés használatát az általam vizsgált rendszer esetén.

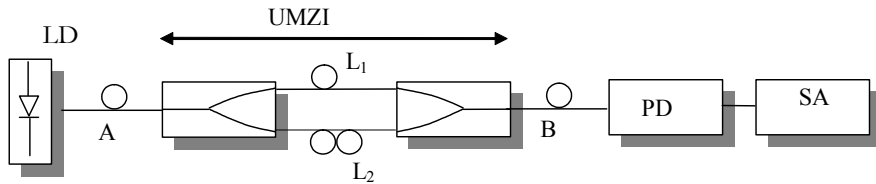
Számítógépes kísérletezésem egyik eredménye tehát, hogy mikrocsip méretű Nd:YVO₄ szilárdtestlézerek esetén viszonylag alacsony (35%) modulációs mélységre van szükség a bifurkálódás és a kaotikus üzem beindulásához. Az irodalmi adatok alapján [Luo, 1998], [Klische, 1984], [Arecchi, 1982] más szilárdtestlézereknél nagyobb modulációs mélységek esetén (pl.: 85%) lépett fel a perióduskettőző, illetve a káosz jelensége. Vizsgálatom eredményeként kimondható tehát, mikrocsip méretű Nd:YVO₄ szilárdtestlézer esetén a perióduskettőző bifurkációk sora már 35%-os modulációs mélységek esetén föllép, ezért mind az információ átviteli célú pumpálójel modulációs alkalmazások során, mind pedig zajcsökkentő optoelektronikai rendszer tervezésekor ennél kisebb modulációs mélységet kell alkalmazni a kaotikus üzem elkerüléséhez, illetve az ezzel járó zavaró kaotikus spektrális komponensek kivédése érdekében.

A bifurkációs viselkedés határát jelentő modulációs mélység ismeretében meghatározható a visszacsatoló körben alkalmazható maximális erősítés értéke is, így erősítés határt szabhatnak a kaotikus üzem elkerüléséhez, mely a helyes gyakorlati tervezést nagyban segítheti.

T1/5: A lézer nemautonóm sebességegyenleteinek megoldása során kimutattam, hogy Nd:YVO₄ esetén már 35%-os modulációs mélység esetén bifurkálódásba kezdenek a lézert leíró nemlineáris differenciálegyenletrendszer megoldásai. E számításokkal tehát határt adtam a visszacsatoló kör által létrehozandó maximális modulációs mélységre. Az eredmények igazolták, hogy a optoelektronikai visszacsatolás során a nemkívánt kaotikus működést előidéző modulációs mélység a megfelelő zajcsökkentéshez szükséges modulációs mélységgel egy nagyságrendben van, tehát ilyen rendszer tervezése során szükséges annak dinamikus ellenőrzése is. Először vizsgáltam a kaotikus jelenség fellépésének lehetőségét optoelektronikai visszacsatolás segítségével csökkentett zajú szilárdtestlézer esetén. ([Csörnyei, 2007d])

2. téziscsoport: Félvezető lézerek relatív intenzitásajának csökkentése aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer segítségével

Kísérletileg igazoltam, hogy a 2.1. ábrán látható aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer elsősorban félvezető lézerek esetében zajcsökkentő struktúráként alkalmazható. A működési feltételek optimalizálása érdekében, megvizsgáltam a struktúra fáziszaj-intenzitásaj konverzióját, melyhez kiindulásként egy az irodalomban talált számítást [Armstrong, 1966] használtam föl, mely azonban az interferométer bemenetén csak fáziszajjal terhelt jelet vett figyelembe. Ezzel szemben az általam részletesen közölt számítás fáziszajt és intenzitásajt egyaránt tartalmazó bemeneti jelet feltételezett. Megvizsgáltam a fáziszaj-intenzitásaj konverziót a bemenő jelet terhelő fehér amplitúdójaj és sávhatárolt fehér amplitúdójaj esetén is.

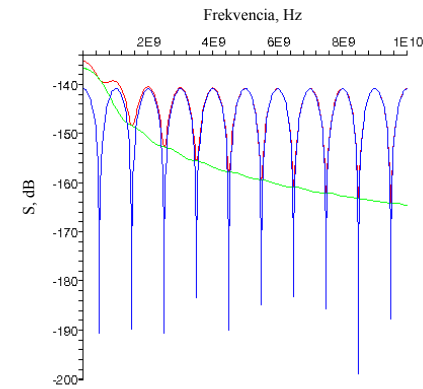


2.1. ábra Az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer (Unbalanced Mach-Zehnder Interferometer) az ábra A és B pontja között látható. A mérési összeállításban az interferométert elhagyó lézer (LD) jel fotodiódával (PD) detektálva spektrumanalizátoron (SA) vizsgálható.

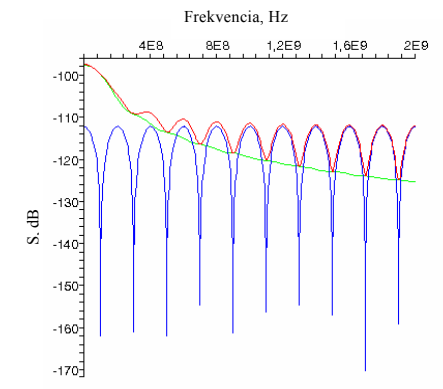
Számításaim egyik fontos eredménye a fáziszajt és fehér amplitúdójaj eredetű intenzitásajt egyaránt tartalmazó bemeneti jellel meghajtott aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer kimeneti teljesítményspektruma, melynek segítségével teljes képet kaptam az interferométerben lejátszódó zajkonverzió mértékéről. A képletben δ a vonalszélesség, σ a zaj szórása, τ az interferométer késleltetési különbsége.

$$S_i = 2\pi\delta_D(\omega) \left\{ \frac{1}{4} + \frac{1}{2}\sigma_\xi^2 + \frac{1}{4}\sigma_\xi^4 + \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sigma_\xi^2 \right] \exp\left(-\frac{1}{2}\delta\tau\right) + \frac{1}{4}\exp(-\delta\tau) \right\} + \frac{1}{2}\sigma_\xi^4 + \frac{1}{2}\sigma_\xi^2 \cos(\omega\tau) + \frac{\exp(-\delta\tau)}{\delta} \left(\frac{(2\pi f/\delta)\sin(2\pi f\tau) + \sinh(\delta\tau)}{1 + (2\pi f/\delta)^2} - \frac{\sin(2\pi f/\delta \cdot \delta\tau)}{2\pi f/\delta} \right) + \left[2\sigma_\xi^2 + 2\sigma_\xi^2 \cos(\omega\tau) \right] \frac{\exp(-\delta\tau)}{\delta} \frac{(2\pi f/\delta)\sin(2\pi f\tau) + \sinh(\delta\tau)}{1 + (2\pi f/\delta)^2}$$

A kimeneti spektrális teljesítménysűrűség számításával történő meghatározásával sikerült pontosan meghatározni a fáziszaj és intenzitásaj eredetű kimeneti összetevők arányát. Megmutattam továbbá, hogy sávhatárolt fehér amplitúdójaj eredetű intenzitásajjal terhelt bemeneti jel esetében a kimeneten számítható intenzitásaj visszavezethető a fehér zaj esetére zárt alakban levezetett összefüggésre. A fenti számítási eredmény alapján lehetővé vált az aszimmetrikus Mach-Zehnder interferométer mint zajcsökkentő struktúra tervezési eljárásának kidolgozása, mivel segítségével különválasztható a fáziszaj eredetű és az intenzitásaj eredetű kimeneti intenzitásaj. 2.2. és 2.3. ábrák a kimeneti teljesítménysűrűségét ábrázolják egy-egy tipikus koherens és inkoherens esetre.



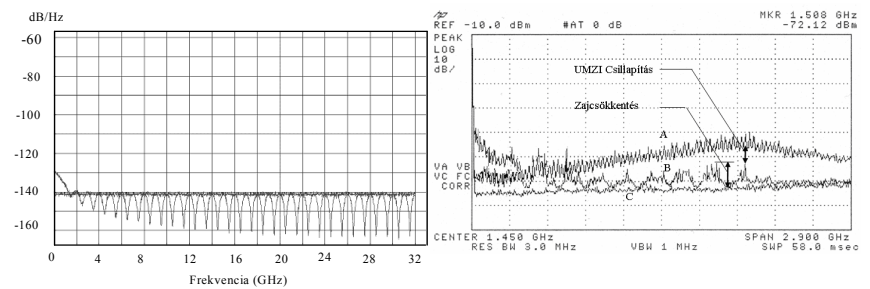
2.2. ábra Kimeneti spektrum 2MHz vonalszélességű, DFB lézer (RIN=-140dB/Hz) és 1ns késleltetés-különbségű UMZI esetén. A kék görbe a fáziszaj nélküli, a bemeneten csak intenzitásajt feltételező esetet mutatja, a zöld görbe a fáziszajból kialakuló intenzitásajt adja. Az eredő a vörös görbe.



2.3. ábra Kimeneti spektrum 20MHz vonalszélességű, FP lézer (RIN=-110dB/Hz) és 5ns késleltetés-különbségű UMZI esetén. A kék görbe a fáziszaj nélküli, a bemeneten csak intenzitásajt feltételező esetet mutatja, a zöld görbe a fáziszajból kialakuló intenzitásajt adja. Az eredő a vörös görbe.

Az eredményekből egyértelműen meghatározható, hogy adott lézer vonalszélesség és interferométer úthosszkülönbség esetén mely frekvenciákon valósítható meg zajcsökkentés, vagyis hogy megyik az az alsó határfrekvencia ami fölött a fáziszaj eredetű kimeneti intenzitásaj a lézer eredeti intenzitásaja alá esik. Fontos továbbá a koherens és inkoherens struktúra kimenetén megjelenő zajszintek közötti jelentős különbség.

A számításokat számítógépes szimulációk végzésével verifikáltam (2.4. ábra). A számításal és számítógépes szimulációs eljárással elért eredményeket, megvalósított zajcsökkentő struktúrán mért eredmények bemutatásával egészítettem ki és támasztottam alá (2.5. ábra). A 2.5. ábrán látható eredmény jó egyezést mutat a 2.3. ábrán számított értékekkel, ami a következő altézis kimondását engedi meg.



2.4. ábra A 2.2. ábrán bemutatott számított eredmény VPI szimulátorral elvégzett ellenőrzése.

2.5. ábra Mért zajcsökkentés. A) FP lézer RIN. B) az UMZI segítségével megvalósított zajcsökkentés. C) a mérőrendszer zaja.