



## SZAKDOLGOZAT FELADAT

**Kárpát Flóra**

Villamosmérnök hallgató részére

### Nemlineáris Raman szórás vizsgálata optikai kvantumkommunikációs rendszerekben

A kvantum alapú kulcsszétosztás elterjedéséhez szükséges, hogy a technológia együtt tudjon működni a jelenlegi klasszikus optikai hálózatokkal. Ezt a klasszikus és kvantum csatornák hullámhossz multiplexálásával lehet megoldani, ami meghatározza a kvantum csatorna minőségét.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- A szakirodalom alapján mutassa be a kvantum és klasszikus hálózatok integrációja során fellépő, a kvantumcsatorna minőségét befolyásoló hatásokat!
- Készítsen az üvegszál alapú, optikai távközlési rendszerekben kiküszöbölhetetlen nemlineáris Raman szórásra részletes modellt! A modellt Matlab környezetben implementálja! A modell legyen alkalmas a következő esetek vizsgálatára:
  - Egyirányú és ellenirányú terjedés.
  - Több szekcióból álló link.
  - Raman szórás szempontjából az optimális hullámhossz kiosztás meghatározása.
- Igazolja a modellben alkalmazott Raman szórási értékeket kísérleti módszerekkel!
  - Tervezze meg a mérési elrendezést a várható értékek figyelembevételével!
  - Végezze el a méréseket különböző belépő optikai teljesítmény, hullámhossz és optikai szálhossz esetén!

**Tanszéki konzulens:** Gerhátné Dr. Udvary Eszter

**Külső konzulens:**

Budapest, 2023. szeptember 25.

Dr. Imre Sándor  
egyetemi tanár  
tanszékvezető



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Kárpát Flóra Viktória

**NEMLINEÁRIS RAMAN SZÓRÁS  
VIZSGÁLATA OPTIKAI  
KVANTUMKOMMUNIKÁCIÓS  
RENDSZEREKBE**

KONZULENS

Gerhátné Dr. Udvary Eszter

BUDAPEST, 2023

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Bevezetés .....</b>	<b>8</b>
1.1 Kvantumbit (Qubit).....	8
1.2 QKD (Kvantum alapú kulcsszétosztás) .....	9
1.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).....	10
1.4 Zajok, zavarok .....	11
<b>2 Spontán Raman Szórás modellezése .....</b>	<b>13</b>
2.1 SRS-t leíró képlet.....	14
2.2 Szakirodalmi áttekintés .....	16
2.3 Számítások .....	19
2.4 Saját modell eredményei.....	22
2.4.1 Kvantum csatorna elhelyezkedése szerinti ábrázolás .....	23
2.4.2 Távolság szerinti ábrázolás .....	25
2.4.3 Teljesítmény ábrázolása.....	27
2.4.5 Klasszikus csatornák erősítésének hatása .....	29
<b>3 Előkészítő mérések.....</b>	<b>31</b>
3.1 Mérési elrendezés tervezése.....	31
3.2 Felhasznált eszközök mérése .....	32
3.2.1 Hangolható lézer .....	32
3.2.2 Izolátor .....	33
3.2.3 Cirkulátor .....	34
3.2.4 Hangolható sáváteresztő szűrő.....	35
<b>4 SRS mérése .....</b>	<b>37</b>
4.1 SRS bemeneti optikai teljesítménytől való függése .....	38
4.2 Optikai szál hosszának hatása .....	39
4.3 Hullámhossz változtatásával .....	39
4.4 Eredmények kiértékelése .....	41
<b>5 A módosított modell.....</b>	<b>43</b>
5.1 Képlet kiegészítése .....	44
5.2 Változók meghatározása .....	45

5.3 Továbbfejlesztett modell eredményei .....	46
5.4 Összehasonlítás a V alakú modellel.....	47
5.5 Konklúzió.....	48
<b>6 Kiegészítő mérés.....</b>	<b>50</b>
<b>7 Összefoglalás.....</b>	<b>52</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>53</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>54</b>

# HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Kárpát Flóra Viktória**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2023. 12. 07.

.....  
Kárpát Flóra Viktória

# Összefoglaló

Az adatok és kommunikáció biztonsága napjainkban, a digitális korban létfontosságú szerepet játszik. Azonban a jelenleg használt kriptográfiai megoldások nem feltétlenül lesznek elegendőek a gyorsan fejlődő kvantumtechnológia jövőbeli újításaival szemben. A kvantumszámítógépek képesek lennének feltörni a jelenlegi titkosítási módszereket, ezzel veszélyeztetve személyes adatok, kormányzati információk vagy akár üzleti titkok biztonságát. Erre megoldást adhat a QKD (Quantum Key Distribution), ami a kvantummechanika törvényeire alapozva garantálja a kommunikáció teljes biztonságát.

A QKD rendszerben a két fél egy közös, titkos kulcsot használ, amelyet kvantumcsatornán keresztül osztanak meg. Ez a kulcs a fotonok kvantumállapotából származik, és a no-cloning tétel biztosítja, hogy nem lehet lemásolni egy ismeretlen kvantumállapotú fotont, aminek köszönhetően a kulcs biztonsága garantált, és a kommunikáció lehallgathatatlan. A technológia elterjedéséhez fontos, hogy az említett kvantum csatorna integrálható lehessen már meglévő optikai hálózatokba (például DWDM hálózatba), és működni tudjon klasszikus csatornák mellett. Azonban mivel a kvantum csatornának teljesítmény szintje nagyságrendekkel kisebb egy klasszikus csatornánál, az ebből adódó zajok jelentősen befolyásolhatják a kvantum csatornát. Legnagyobb problémát a nemlineáris zajok jelentik, mivel ezek az optikai szálon belül bárhol létrejöhetnek, így nem küszöbölhetők ki egyszerűen szűrők használatával. A kvantum csatornára nézve a két legjelentősebb nemlineáris hatás az FWM (Négyhullám keverés) és az SRS (Spontán Raman szórás). Azonban az FWM hatása jelentősen csökken 2-3 csatornányi védősáv alkalmazásával, így az SRS lesz az egyetlen hatás, melyet nem lehet szűréssel vagy védősávokkal csökkenteni.

SRS minőségromtó hatásának felméréséhez először elemzett szakirodalmak alapján MATLAB modell-t készítettem, ami segítségével megvizsgáltam, hogy különböző paraméterek, elrendezések hogyan befolyásolják a hatást, és milyen módon lehet ezt minimalizálni. Majd az egyetemi laborban méréseket végeztem az elméleti modell eredményeinek ellenőrzésére, különböző szálhosszokkal, teljesítményszintekkel és csatornaelrendezésekkel. Végül a mérési eredmények alapján módosítottam a korábbi modellt, amelynek eredményeként pontosabb eredményeket kaptam.

# Abstract

In today's digital age, the security of data and communications is vital. However, the cryptographic solutions currently in use may not be sufficient to cope with the future innovations of rapidly evolving quantum technologies. Future quantum computers could be able to crack current encryption methods, compromising the security of personal data, government information or even trade secrets. A solution to this problem could be QKD (Quantum Key Distribution), which guarantees complete security of communications based on the laws of quantum mechanics.

In QKD, the two parties use a secret key, which is shared through a quantum channel. This key is derived from the quantum state of the photon, and the no-cloning theorem ensures that a photon with an unknown quantum state cannot be duplicated, thus guaranteeing the security of the key, and the communication cannot be eavesdropped. For the technology to be widely used, it is important that the quantum channel can be integrated into already existing optical networks (e.g. DWDM networks) and can operate alongside classical channels. However, as the power level of a quantum channel is orders of magnitude lower than a classical channel, the resulting noise can significantly affect the quantum channel. The biggest problem is nonlinear noise, which can occur anywhere in the optical fibre and cannot be eliminated simply by using filters. For the quantum channel, the two most significant nonlinear effects are FWM (Four-Wave Mixing) and SRS (Spontaneous Raman Scattering). However, the effect of FWM is significantly reduced using 2-3 channel wide protective zones, leaving SRS as the only effect that cannot be reduced by filtering or protective zones.

In order to assess the detrimental effect of SRS, I first created a MATLAB model based on the analysed scientific research, which I used to investigate how different parameters affect the impact, and how it can be minimised. I then carried out experiments in the university laboratory to verify the results of the theoretical model, using different fibre lengths, power levels and channel arrangements. Finally, I used the measured data to modify the previous model, resulting in more accurate results.

# 1 Bevezetés

A technológia fejlődésével a biztonságos, lehallgathatatlan kommunikáció fenntartása egyre fontosabb tényezővé válik. Ezt a távközlésben egy új, ígéretes lehetőség, a kvantum alapú kulcsszétosztás biztosíthatja, a kvantummechanika törvényeit kihasználva a két fél közötti kommunikáció titkosításával. Ehhez új, kvantum csatornának külön dedikált sötét szálalás hálózat kiépítése rendkívül költséges, gátolva a technológia elterjedését. Megvizsgálandó opció a kvantum csatorna implementálása már meglévő hálózatokba. Ez azonban a klasszikus csatornák nagyságrendekkel nagyobb teljesítménye miatt problémákat vet fel.

Szakedolgozat munkám során a kvantum csatorna meglévő DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) hálózattal való integrációjából fellépő zajok közül a Spontán Raman Szórás (SRS) hatását vizsgáltam meg. Elsődleges célom az volt, hogy meghatározzam, hogy milyen csatorna elrendezéssel lehet ezt a zajt minimalizálni. Mivel a klasszikus kommunikációs rendszerek esetében ez a nemlineáris jelenség elhanyagolható mértékű hatást gyakorol, ennek következtében a témában rendelkezésre álló kutatások száma korlátozott.

A következő pontokban bemutatom a szakirodalom alapján kidolgozott MATLAB modellem és annak szimulációs eredményeit. Ezeket követően ismertetem a saját méréseimet, és ezekre építve továbbfejleszttem az eddig használt modellt.

## 1.1 Kvantumbit (Qubit)

A kvantumkommunikáció alapjait a kvantumbitek (avagy qubit, vagy qbit) adják. Abban különböznek a klasszikus értelemben vett bittől, hogy egyszerre van a 0 és 1 értékek szuperpozícióban, egészen a megfigyelés időpontjáig, amikor az egyik állapotba bebillennek. Ezt a szuperpozíciót a következő képlettel lehet jellemezni: [2]

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

ahol az  $\alpha$  és  $\beta$  komplex értékek, amelyeknek a négyzete megadja azt, hogy a bit mekkora valószínűséggel lesz 0 vagy 1. Tehát ebből következtetve érvényesülnie kell az egyenlőségnek, hogy  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , és ez ábrázolható az úgynevezett Bloch-gömbön.





A fotonok szuperpozíciója és azok kvantummechanikai tulajdonságai adják a kvantumkommunikáció alapjait, és teszik lehetővé a biztonságos és titkos információátvitelt.

## 1.2 QKD (Kvantum alapú kulcsszétosztás)

Kvantum alapú kulcsszétosztás, azaz QKD (Quantum Key Distribution), a két fél (Alice és Bob) közötti titkosított információ átadást biztosítja, úgy, hogy ehhez harmadik fél (Eve) ne tudjon hozzáférni. Ez a kommunikáció titkos kulcsok használatával vihető végre, amit csak Alice és Bob ismer. Ezt használva kódolja – és dekódolja az üzeneteket.

A rendszer titkosítását a kvantummechanika törvényei, a no-cloning tétel biztosítja, ami szerint nem lehet egy azonos másolatot készíteni egy olyan kvantum állapotról, amit nem ismerünk. Így a kvantum alapú kulcs szétosztásban biztosítva van, hogy a fotont nem lehet lemásolni, így a lehallgatót garantáltan detektálják.

A kvantumkulcs-szétosztás két fő típusa különböztethetjük meg, az összefonódáson alapuló és a prepare-and-measure. Az összefonódáson alapuló módszerben a kulcsot egy összefonódott fotonpár biztosítja, ahol az egyik foton mérése automatikusan meghatározza a másik foton kvantumállapotát is, a köztük lévő távolságtól függetlenül. Prepare-and-measure esetében a küldő fél, Alice előkészít egy kvantumállapotot, amelyet a fogadó fél, Bob megmér. A típusoknál különböző protokollok adják meg a kulcs generálásának lépéseit. A legelterjedtebb összefonódáson alapuló protokoll az E91, vagy más néven Ekert protokoll, és a prepare-and measure protokollok közül pedig a BB84 és B92 a legismertebbek. [1]

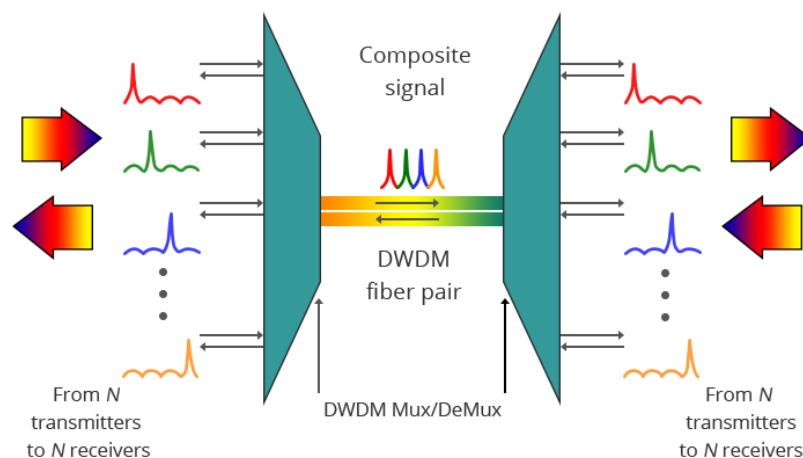
 <b>Transmitting end</b>	Transmitted bits	0	0	1	0	1	0	1	0	1
	Transmission basis	$\otimes$	$\oplus$	$\otimes$	$\oplus$	$\otimes$	$\oplus$	$\oplus$	$\otimes$	$\oplus$
	Transmitted information	$\nearrow$	$\downarrow$	$\swarrow$	$\downarrow$	$\swarrow$	$\downarrow$	$\leftrightarrow$	$\nearrow$	$\leftrightarrow$
 <b>Receiving end</b>	Measuring basis	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\otimes$	$\otimes$	$\otimes$	$\otimes$	$\oplus$
	Received results	$\leftrightarrow$	$\downarrow$	$\leftrightarrow$	$\downarrow$	$\swarrow$	$\leftrightarrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\leftrightarrow$
	Received bits	1	0	1	0	1	1	0	0	1
	Bases match	NO	YES	NO	YES	YES	NO	NO	YES	YES
	Derived key	-	0	-	0	1	-	-	0	1

1.1. ábra - titkos kulcs generálása BB84 protokollal [3]

BB84 protokoll kulcsgenerálási lépéseit az 1.1. ábra mutatja be. Alice a biteket véletlenszerűen választott bázisokban küldi. Bob is teljesen véletlenszerűen választja, hogy milyen bázisban méri meg a kapott fotonokat. Ha azonos bázisban méri, mint amibe Alice azt kódolta, akkor a helyes értéket fogja mérni. Azonban nagyjából az esetek felében elő fog fordulni, hogy rossz bázisban mér. Ekkor a foton az eredeti bit értékétől függetlenül 50%-50% eséllyel fog bebilleni a 0 vagy 1 értékbe. Majd klasszikus csatornán keresztül Alice és Bob megosztják egymással a használt bázisokat, és elvetik azokat a mért eredményeket, amelyeknél nem azonosak a bázisok, és így kialakul a végső titkos kulcs. B92 protokoll hasonló elven működik, mint a BB84, azzal a különbséggel, hogy csupán 2 féle polarizációt használ 4 helyett. [1]

### 1.3 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

QKD gyakorlati megvalósítása már meglévő hálózatokban kihívást jelent, hiszen így a kis amplitúdójú, néhány fotonnal működő kvantum csatornának klasszikus csatornák mellett kell tudnia működni. A továbbiakban a sűrű hullámhossz-osztásos multiplexer (DWDM) csatornán történő kulcsszétosztásról lesz szó.

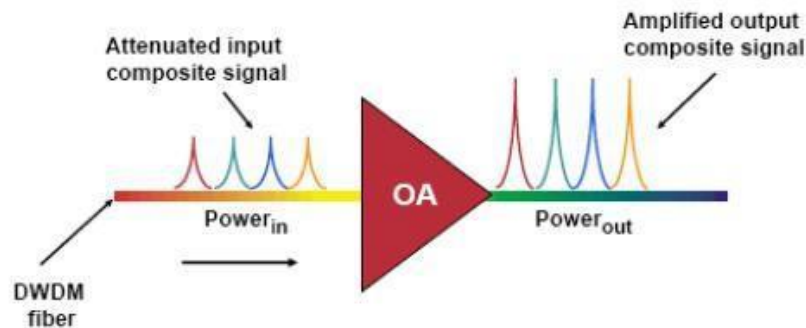


1.2. ábra - DWDM működését bemutató ábra [4]

DWDM működését a fenti 1.2. ábra szemlélteti. Általában 40, 80 vagy akár 98 bemenő jelhez különböző hullámhosszokat rendel, majd ezeket multiplexálja, és ez kerül az optikai szálra. Hullámhossztartománya 1550 nm, és környéke (C-sáv: 1525-1565 nm), a különböző csatornák 50 GHz vagy 100 GHz, azaz 0.4 nm vagy 0.8 nm távolságra helyezkednek el egymástól.

Számolások során és modellezéseimnél 50 GHz-es, 98 csatornás, méréseimnél 96 csatornás DWDM rendszert vizsgáltam meg. Ehhez a Nemzetközi Távközlési Egyesület (International Telecommunication Union - ITU) által meghatározott szabványt vettem alapul. [5] Adott hullámhosszok, frekvenciákhoz számozott csatornák vannak rendelve, így későbbiekben ezekre a csatorna számokra fogok hivatkozni.

A DWDM rendszernek része az optikai erősítők (1.3. ábra), ezek az átviteli távolságot növelik, általában klasszikus optikai kommunikációs rendszerekben 60-80 kilométerenként van szükség optikai erősítőkre. A C sávban használt erősítő az Erbium-adalékolt szálerősítő (EDFA). Végül a demultiplexer szétválasztja az egyes hullámhosszokat, majd külön szálakon továbbítja.[4]

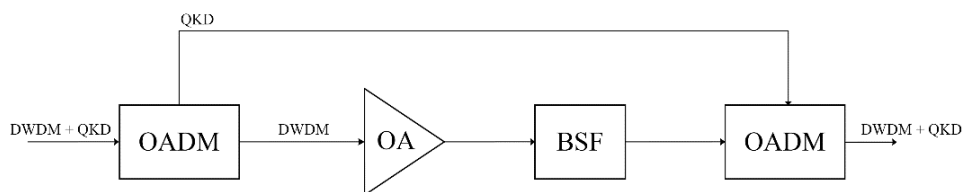


1.3. ábra - optikai erősítő [4]

## 1.4 Zajok, zavarok

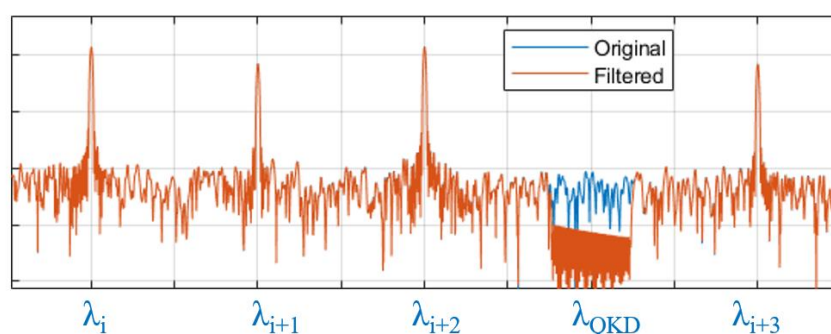
Klasszikus, DWDM hálózaton történő kvantum kulcs szétosztás megvalósítása számos problémát vet fel. Mivel a kvantum jel esetében csupán néhány fotonról van szó, ennek a jelnek az amplitúdója nagyságrendekkel kisebb lesz a többi csatorna jelenél. Ezeknek a multiplexálása a kvantum jel számára jelentős zajt okozhat. Erre megoldást jelenthet a klasszikus csatornák sávszűrése multiplexálás előtt. [7]

Az optikai erősítők is problémát jelentenek a QKD számára. Egyrészt a kvantum jelet nem lehet erősíteni, a no-cloning tétel miatt, másrészt az erősített spontán emisszióból (ASE) származó zaj maradandó kárt okozna a kvantum jelnek. [6] Ezért a kvantum csatornával ki kell kerülni az erősítőt. (1.4. ábra)



**1.4. ábra – optikai erősítő kikerülése QKD-val (OADM: Optikai add-drop multiplexer, OA: optikai erősítő, BSF: sávzáró szűrő)**

Az erősítő előtt optikai add-drop multiplexerrel (OADM) leválasztjuk a kvantum jelet a klasszikus csatornáktól. Az optikai erősítő után sávzáró szűrővel a klasszikus csatornák erősítése során keletkezett zajt a kvantum csatorna hullámtartományán lecsökkentjük, amit az 1.5. ábra szemléltet. Majd újra hozzáadjuk OADM-mel a kvantum jelet.



**1.5. ábra - a QKD hullámtartományán szűrt jel**

Demultiplexeren való szétválasztás után a kvantum jelet egy, vagy ha szükséges akkor több, szűrőn átvezetjük, hogy a csatorna áthallást a szükséges mértékben lecsökkentsük.

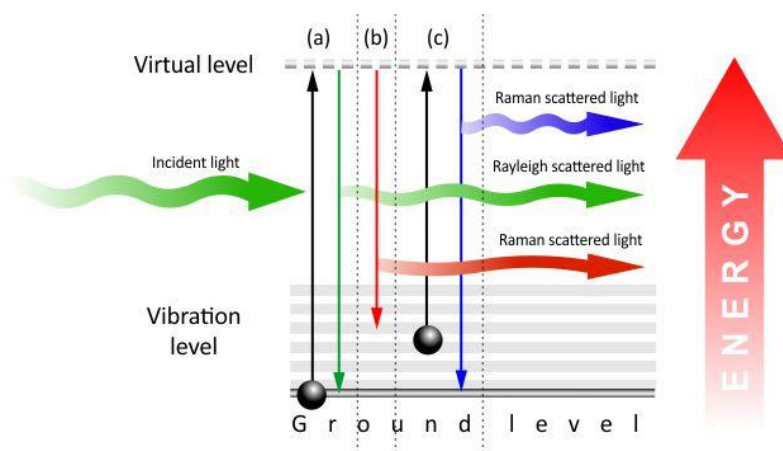
## 2 Spontán Raman Szórás modellezése

Nemlineáris zajok is befolyásolhatják a kvantum jelet. Ezek az optikai szál bármelyik pontjában létrejöhetnek, ezért a korábbi megoldások, mint a szűrőhasználat vagy kikerülés, itt nem használható.

Az egyik ilyen zaj a négyhullám-keverés (FWM) Kerr-effektus hatásaként jön létre, amikor két vagy több jel kölcsönhatásba lép egymással. Emiatt nem kívánt intermodulációs termékek jelennek meg. Mivel a csatornák periodikusan vannak elhelyezve, ez a hatás megjelenhet a csatornák dedikált sávján. QKD csatornán ezt elkerülni úgy lehetne, hogy a klasszikus csatornáktól szeparáljuk védő sávval. [6]

Egy másik nemlineáris zajt a spontán Raman szórás (SRS) okozza, ami jelentősebben befolyásolja a kvantum csatornát, mint az előbb említett FWM. [13] Rugalmatlan, vagy Raman szórás akkor jön létre, mikor nem ugyanakkora energiájú foton válik ki a molekulából, mint a beeső fotoné, ilyenkor az új foton hullámhossza és frekvenciája is eltérő lesz (2.1. ábra). Ha a két foton energiája egyenlő, rugalmas, azaz Rayleigh szórásnak nevezzük.

Csökkent energiánál Stokes szórásról beszélhetünk, nagyobb lesz a foton frekvenciája, így a hullámhossza kisebb. Ha nagyobb lesz a foton energiája, az anti-Stokes szórás, ahol kisebb a foton frekvenciája, hullámhossza nagyobb. Emiatt fotonok a klasszikus csatornákból befolyásolhatják a kvantum csatornákat, ha szórás után a foton frekvenciája a kvantum csatorna frekvencia tartományába esik. [8]



2.1. ábra - a foton kibocsátásának 3 állapota [8]

## 2.1 SRS-t leíró képlet

$$SRS = P_0 \cdot z \cdot \beta(i_q) \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \eta \cdot \frac{\tau}{h\nu} \quad (2)$$

A fenti képlet [9] a detekciós kapu hossza alatt beütközött fotonok számát adja meg. A következő szakaszban értelmeztem a képletben szereplő változókat, valamint ezekhez egy elméleti rendszer alapján értéket adtam, amiket egy MATLAB modellben felhasználtam.

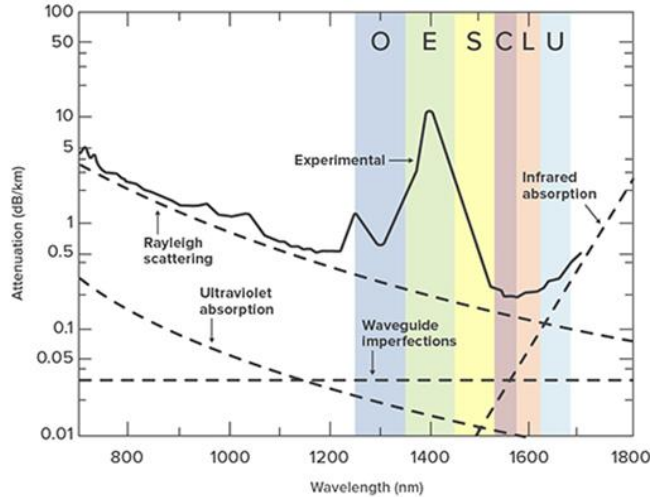
$P_0$ : a klasszikus csatornák bemeneti teljesítménye, általában -3dBm és 3dBm közti értékű egy csatornára nézve.

$z$ : szál hossza, tehát a távolság, amit a fotonoknak meg kell tenniük. Egyrészt, a távolság növelésével egyre több szórt foton lesz, hiszen a szórt fotonok tovább terjednek, azonban a szál csillapítása miatt a szórt zaj csökkenni, csillapodni fog.

$\eta$ : detekciós hatásfok. Azt az értéket jelöli, hogy a fotondetektor a bejövő fotonokat mekkora hatásfokkal tudja elektromos árammá alakítani, tehát hogy a fotondetektorhoz érkező fotonoknak hány százaléka lesz detektálva. Több faktortól függ, mint a használt fotondetektor típusától, a hullámhossztól, az optikai teljesítménytől. Például a szilícium fotodióda detekciós hatásfoka körülbelül 70% - 90%-ig terjed.

$\beta(i_q)$ : SRS együtthatója, a kvantum csatorna ( $i_q$ ) klasszikus csatornához képest való elhelyezkedésétől, valamint a csatornatávolságtól függő változó. Későbbiekben az SRS modellezésével egyik cél ennek a változónak a minimalizálása, a csatorna elrendezéstől való függés ábrázolásával.

$\alpha$ : átlagos szálcsillapítási együttható, a DWDM hálózatokban használt C-sávban (hullámhossztartománya 1525nm – 1565nm) a legalacsonyabb az optikai szál csillapítása, ami kb. 0.2 dB/km.



2.2. ábra – optikai szál csillapítása különböző sávokban [14]

Azonban ahhoz, hogy számolhassak a 0.2 dB/km csillapítási együtthatóval, át kellett váltanom dB/km-ről 1/km formátumba. Ezt a következő képen tettem meg:

$$\frac{P}{P_0} = 10^{(-\alpha_{dB/km} * Z / 10)}, \quad \text{és} \quad \frac{P}{P_0} = e^{(-\alpha_{1/km} * Z)}$$

$$\ln(10^{(-\alpha_{dB/km} * Z / 10)}) = \ln(e^{(-\alpha_{1/km} * Z)})$$

$$-\alpha_{1/km} * Z = -\alpha_{dB/km} * Z * \ln(10) / 10 \quad (3)$$

$\tau$ : detekciós kapu hossza, ez az optikai jel detektálásának, és elektromos árammá való konvertálásának időtartományt adja meg. Ez a paraméter befolyásolja a detektálási folyamat pontosságát, és gyorsaságát. Értéke függ a használt fotondetektor típusától, karakterisztikájától, ez lehet akár pikoszekundum, vagy másodperc nagyságrendű is. A számolásaimhoz a 50-70 ps nagyságrendet választottam.

$h\nu$ : foton energiája  $\nu$  átlagos frekvenciával (klasszikus csatornákból). Egy foton energiáját a következő képlettel lehet kiszámolni:  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ . Mivel DWDM hálózat a C-sávban helyezkedik el, így az átlagos hullámhossz ( $\lambda$ ) 1550 nm. A  $c$ , fénysebesség  $3 \cdot 10^8$  m/s, míg a Planck állandó ( $h$ ) értéke  $6.626 \cdot 10^{-34}$  Js. A korábban említett képlettel így egy foton átlagos energiájának kiszámolása:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \cdot 10^{-34}) \cdot (3 \cdot 10^8)}{1550 \cdot 10^{-9}} = 1.28 \cdot 10^{-19} J \quad (4)$$

$P_0$	$z$	$\eta$	$\beta(i_q)$	$\alpha$	$\tau$	$h\nu$
(-3dBm) - 3dBm	-	70-90%	-	0.2dB/km	50-70 ps	$1.3 \cdot 10^{-19}$ J

1. táblázat – SRS képletében szereplő változók meghatározott értéke

Az egész rendszerre nézve az összes klasszikus csatornából beütközött fotonok számát kell összegezni. Két különböző esetet nézhetünk, az azonos (co-propagation) és ellentétes irányú (counter-propagation) terjedés. A co-propagation a kvantum jelnek a szálon belül, a klasszikus csatornával azonos irányú haladását jelenti, míg a counter-propagation az ellenkező irányút. [9]

$$SRS_{co-sum} = z \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \eta \cdot \frac{\tau}{h\nu} \sum P_0 \cdot \beta(i_q) \quad (5)$$

$$SRS_{counter-sum} = \frac{1}{2\alpha} [1 - \exp(-2\alpha z)] \cdot \eta \cdot \frac{\tau}{h\nu} \sum P_0 \cdot \beta(i_q) \quad (6)$$

Ha minden klasszikus csatornának a kiinduló teljesítménye egyenlő, akkor  $P_0$  kiemelhető az összegzésből. Így a beütközött SRS foton számot egy fix paraméterekkel rendelkező rendszer esetében csak a  $\beta$  összege, azaz a kvantum csatorna elhelyezése fogja befolyásolni.

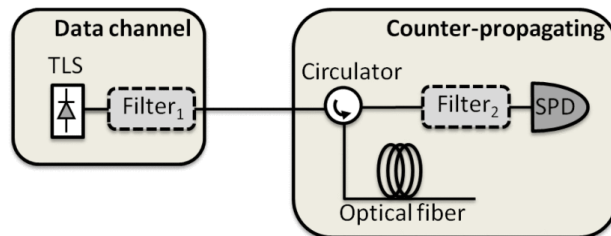
## 2.2 Szakirodalmi áttekintés

Spontán Raman szórás a kvantum csatornára ható zajának kiszámításához és modellezéséhez szükséges az SRS együttható meghatározása, arra az esetre nézve, hogy a kvantum csatorna a C sávban helyezkedik el, a klasszikus csatornákkal. Ugyanakkor érdemes figyelembe venni, hogy ha a kvantum csatorna más sávban helyezkedne el, például az 1310 nm-es tartományban, eltérő lesz az SRS hatása a C sávban elhelyezkedő klasszikus csatornákból.

Mivel az SRS zaj a klasszikus kommunikációban elhanyagolható zavarnak tekinthető, kevés kutatás áll rendelkezésre az SRS együttható meghatározásával kapcsolatban. Három kutatás [9][10][11] méréseit, és képleteit vettem alapul a további számításaimhoz, amiknek helyességét saját mérésekkel is alátámasztom későbbi pontokban.

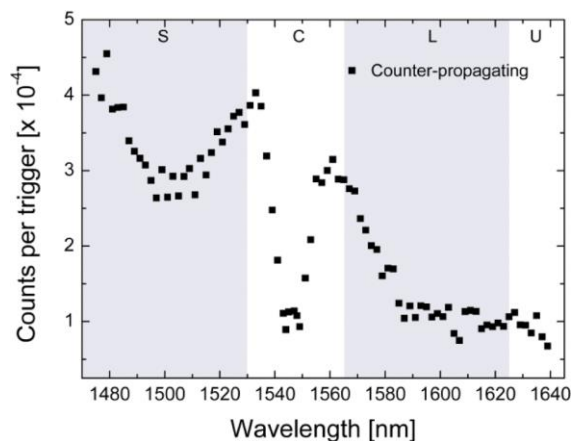


Az első vizsgált cikkben [10] a mérési elrendezés az alábbi képen (2.3. ábra) látható. Egy hangolható lézer (TLS – Tunable Laser Source) 1 mW teljesítményen különböző hullámhosszokon sugároz 7.5 km hosszú optikai szálon, 1470 – 1650 nm-es tartományon belül, míg az elméleti kvantum csatorna 1546.12 nm-en helyezkedik el. Az elrendezés a cirkulátorral a szórt fotonok ellentétes irányú terjedését vizsgálja egyfoton detektoron (SPD). A rendszer még két FBG (Fiber Bragg Grating) szűrőt tartalmaz, a blokkábrán Filter1 és Filter2-vel jelezve. A Filter1 notch filter, azaz keskenysávú sávzáró szűrő, míg a Filter2 sáváteresztő szűrő, középhullámhosszuk az elméleti kvantum csatorna szerint van beállítva, hogy csak az adott hullámhosszra eső fotonok legyenek detektálva.



2.3. ábra – SRS szórodott foton detektáló mérési elrendezése [10]

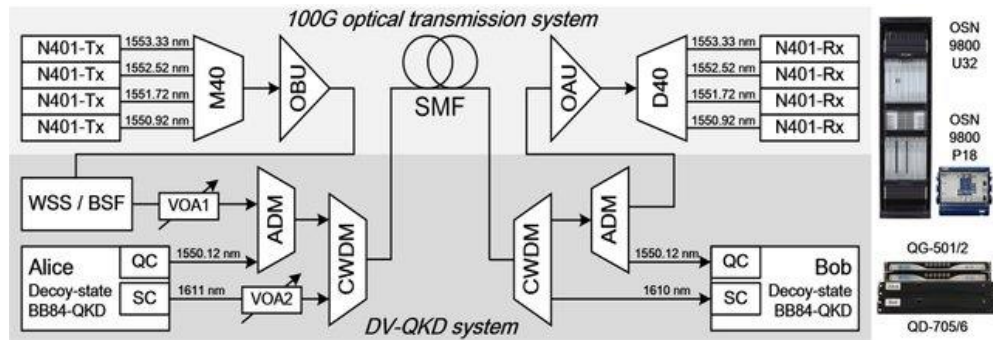
A mérési elrendezésből kapott eredmény a 2.4. ábra mutatja, ami az SRS okozta szórt fotonok számát ábrázolja a vizsgált sávokon (S, C, L és U). Ez az eredmény felhasználható arra, hogy a DWDM hálózatokban használt C sávra meg lehessen határozni az SRS eloszlását. Ebben a sávban lineáris V alakot közelít az eloszlás.



2.4. ábra – ellentétes irányú SRS mérésének eredménye [10]

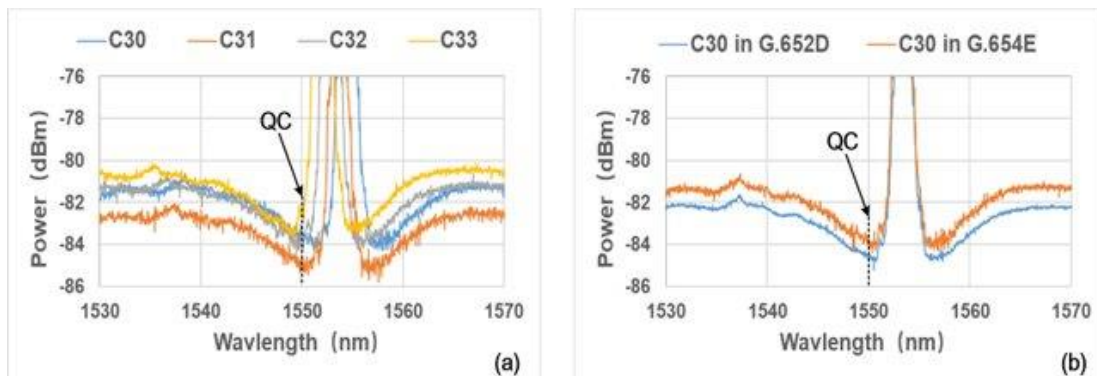
Egy másik mérési elrendezés látható az alábbi képen (2.5. ábra). A rendszer 4 darab 100G-s klasszikus csatornát tartalmaz, melyek 0.8 nm távolságra helyezkednek el egymástól (1550.92 nm, 1551.72 nm, 1552.52 nm és 1553.33 nm). A hálózatnak a

részei a multiplexer (M40), demultiplexer (D40), EDFA (OBU és OAU). Az 1550.12 nm-es kvantum csatornát add-drop multiplexerrel (ADM) adja hozzá a klasszikus csatornákhöz. 20 km-es G.652D, valamint 25 km-es G.654E egymódusú szálon végeztek mérést az azonos irányú SRS-re. [11]



2.5. ábra – kvantum csatornát integráló rendszer elrendezése [11]

A mérések eredménye (2.6. ábra) részben eltér az előzőtől. A két ábrán az SRS okozta zaj teljesítménye van szemléltetve, a különböző színek a különböző csatornákról származó zajt reprezentálják. Az előző mérés ábrájával ellentétben itt nem tiszta V alak látszik, amit egyrészt okozhatja az, hogy az előző mérésnél fotonszám volt ábrázolva, míg itt teljesítmény dBm-ben, azonban ez a tendenciát (hol nő, hol csökken) nem befolyásolja. A vizsgált csatornák hullámhosszának közvetlen közeli tartományában kiugróan magas a zaj mértéke, és csak ezen túl rajzolódik ki körülbelül a V alak, ami a C sáv tartományának a széleihez érve ellaposodik.



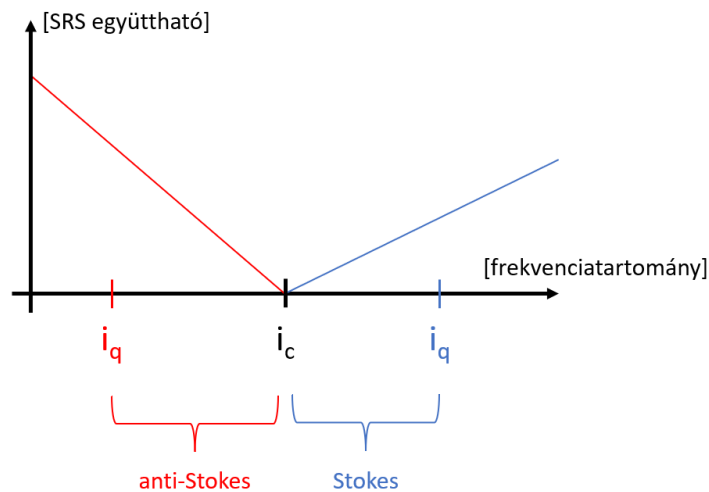
2.6. ábra – klasszikus csatornák SRS zajának teljesítménye, hullámhossz függvényében [11]

Ennek az eltérésnek lehet több oka is, az első mérésnél előfordulhat, hogy ezt a kiugró értéket mérési hibaként, lézerről való áthallásként kezelve nem vették figyelembe. Az is előfordulhat, hogy a második mérésnél olyan módszert használtak a zaj mérésére, ami zavart okozott a vizsgált csatorna hullámhosszán. Azonban mivel a

korábban említett FWM elleni védelem miatt már szükséges a védősáv használata, ha valóban az SRS zaj eloszlása úgy viselkedik, hogy a közvetlen közeli hullámhosszokon kiugróan magas, akkor megoldást jelent az FWM miatti védősáv arra, hogy megvédjük ettől a zajtól.

## 2.3 Számítások

Ezek a szakirodalmak alapján a továbbiakban a V alakos eloszlás közelítést használtam a modellezésre.  $\beta(i_q)$ -nak, az SRS együtthatónak C-sávban V alakú az eloszlását az alábbi egyszerűsített ábra szemlélteti (arra az esetre, ha eltekintünk a [11] tanulmány mérési eredményein látszó kiugrástól):



2.7. ábra – Az SRS együttható eloszlása frekvencia szerint

ITU szabvány szerinti DWDM csatornák számozás a frekvencia növekedésével arányos [12], ezért ezt választottam az x tengelynek a szemléltetés során.

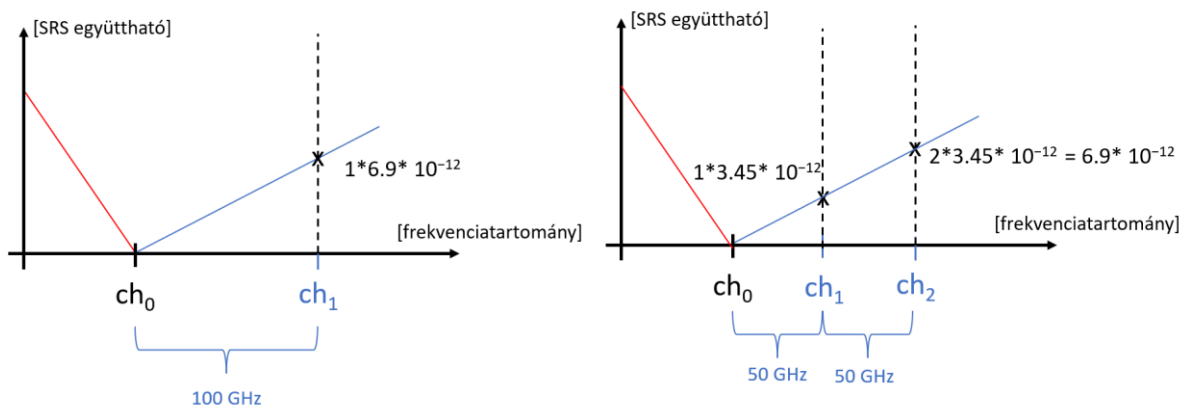
Ezt az eloszlást a következőképp lehet képlettel felírni [9]:

$$\beta(i_q) = \begin{cases} k_1(i_q - i_c), & i_q \geq i_c \\ k_2(i_c - i_q), & i_q \leq i_c \end{cases} \quad (7)$$

- $k_1$ : Stokes szórás meredeksége
- $k_2$ : anti-Stokes szórás meredeksége
- $i_c$ : klasszikus csatorna
- $i_q$ : kvantum csatorna

A  $k_1$  és  $k_2$  értéke függ attól, hogy azonos, vagy ellentétes irányú terjedésről van szó. Az értékek a [10] cikk szerint azonos irányú terjedésnél a Stokes szórás meredeksége  $(6.9 \pm 1.6) \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ , anti-Stokes-nak  $(11.5 \pm 1.0) \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ . Ellentétes irányú terjedés azonos nagyságrendű, és csupán pár tizedes a különbség a normál alakjukban, Stokes szórás meredeksége  $(6.8 \pm 1.3) \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ , anti-Stokes-nak  $(10.8 \pm 0.9) \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ .

Azonban a fent említett forrásban [10] található egységnyi csatornatávolságra vonatkoztatott meredekség értékeket körültekintően kell használni. Az általuk vizsgált 40 csatornás, 100 GHz-es csatorna távolságú rendszerre vannak megadva ezek az értékek. Ezért az általam modellezett a 98 csatornás, 50 GHz-es csatornatávolságú rendszerénél ennek a [10]-es szakirodalomban használt értékek felével kell számolni. Tehát nem az általános értelemben vett meredekség definíciójaként van megadva, hogy a frekvencia távolságtól függ a  $\beta$ , hanem attól, hogy hány csatorna távolságra van. Ezért, ha a csatornák távolságát változtatjuk felére, akkor a korábbi 100 GHz-s egy csatorna távolság helyett most ez 2 csatorna távolságot fog jelenteni, így a meredekség feleződik.

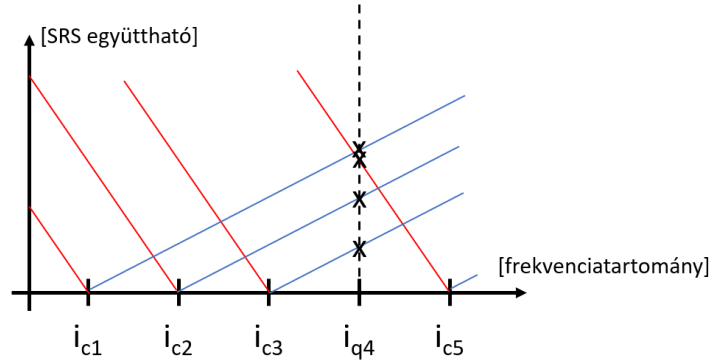


2.8. ábra - meredekség felezés okának ábrázolása

Tehát továbbiakban a következő meredekségekkel kell számolni 98 csatornás, 50 GHz-es rendszerénél: azonos irányúnál a Stokes:  $3,45 \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ , anti-Stokes:  $5,75 \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ , ellentétes irányúnál a Stokes:  $3,4 \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ , anti-Stokes:  $5,4 \cdot 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ .

Egyszerű példával az 2.9. ábra szemlélteti, hogy például egy darab kvantum csatornás, összesen öt csatornás rendszerénél milyen komponensekből tevődik össze az

eredő SRS együttható. A négy klasszikus csatornából származó SRS együtthatót kell összeadni, attól függően, hogy a kvantum csatornához képes hol helyezkednek el.



2.9. ábra – SRS együttható 5 csatornával szemlélítve

$$\begin{aligned} \sum \beta(i_q) &= k_1(i_{q4} - i_{c1}) + k_1(i_{q4} - i_{c2}) + k_1(i_{q4} - i_{c3}) + k_2(i_{c5} - i_{q4}) \\ &= k_1(3 + 2 + 1) + k_2(1) \end{aligned} \quad (8)$$

A fenti példa alapján, általános megoldás is megadható, egy darab kvantum csatorna, és összesen  $n$  csatorna esetén a  $\beta(i_q)$ -ra:

$$\sum \beta(i_q) = \sum_{i_c=1}^{i_q-1} k_1(i_q - i_c) + \sum_{i_c=i_q+1}^n k_2(i_c - i_q) \quad (9)$$

Avagy egyszerűbben kifejezve:

$$\sum \beta(i_q) = k_1 \sum_{j=1}^{i_q-1} j + k_2 \sum_{j=1}^{n-i_q} j \quad (10)$$

SRS hatását úgy lehet minimalizálni, ha az SRS együttható minimális. Ennek kiszámításához át kell írni az összegképletet, úgy, hogy el lehessen a deriválást végezni. Ezt a számtani sorozat összegzési képletével lehet kiszámolni:

$$S_n = \frac{(a_1 + a_n) \cdot n}{2} \quad (11)$$

ahol  $S_n$  a sorozat első  $n$  tagú összege,  $a_1$  az első tagja az összegnek,  $a_n$  az utolsó tagja. Ebben az esetben  $a_1 = 1$ ,  $a_n$  az első tagban  $i_q-1$ , a második tagban  $n-i_q$ . Az  $n$  a DWDM rendszer csatornaszáma, ebben az esetben 98. A számtani sorozat képletével átirított SRS együttható összegképlet a következő:

$$\begin{aligned}
\sum \beta(i_q) &= k_1 \frac{(1 + (i_q - 1)) \cdot (i_q - 1)}{2} + k_2 \frac{(1 + (n - i_q)) \cdot (n - i_q)}{2} \\
&= k_1 \frac{i_q \cdot (i_q - 1)}{2} + k_2 \frac{(1 + (n - i_q)) \cdot (n - i_q)}{2}
\end{aligned} \tag{12}$$

Egy függvény minimuma ott van, ahol a deriváltja egyenlő nullával, tehát a fenti képletet deriválok, és egyenlővé teszem nullával.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{di_q} \sum \beta(i_q) &= 0 \\
k_1 \frac{2i_q - 1}{2} + k_2 \frac{(-1) - 2n + 2i_q}{2} &= 0 \\
k_1 \cdot i_q + k_2 \cdot i_q &= \frac{k_1}{2} + k_2 \frac{1 + 2n}{2} \\
i_{q,min} &= \frac{\left(\frac{k_1}{2} + k_2 \frac{1 + 2n}{2}\right)}{k_1 + k_2}
\end{aligned} \tag{13}$$

Az azonos irányú terjedésére adott Stokes és anti-Stokes meredekséget behelyettesítve, és az n=98-al számolva  $i_q$  minimumára 61.75 kapható eredményül. Mivel a csatornák száma csak egész szám lehet, ezért a kapott eredmény kerekíteni kell. Így ebből kiszámolva a 62. csatorna helyén lesz a legalacsonyabb az SRS együtthatója, egy kvantum csatornás rendszernél.

Ellentétes irányú Stokes és anti Stokes meredekséggel, és az n=98-al számolva  $i_q$  minimumára 60.6364 jön ki, tehát ennél a 61. csatornánál lesz a legalacsonyabb az SRS együttható.

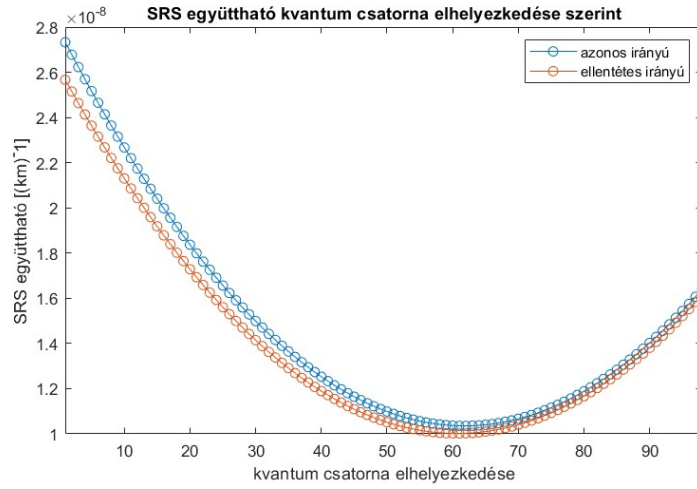
## 2.4 Saját modell eredményei

Az előző fejezetben bemutatott képletek alkalmazásával, a spontán Raman szórás vizsgálatára alkalmas modellt készítettem, MATLAB környezetben. Megvizsgáltam, hogy különböző paraméterek, mint a csatornaelrendezés és szálhossz, hogyan befolyásolják a nemlineáris jelenség hatását, és hogy milyen módon lehet ezt minimalizálni.

## 2.4.1 Kvantum csatorna elhelyezkedése szerinti ábrázolás

Az SRS együttható értékét a kvantum csatorna pozíciójának szerint ábrázoltam. Ezzel leellenőrizhető az optimális csatornára vonatkozó számítás eredménye, miszerint 62-nél van az azonos irányú terjedés függvényének minimuma, ellentétes irányúnál meg 61-nél.

Ehhez egy kvantum csatornát klasszikus csatornák közé integráló hálózatot szimuláló MATLAB scriptet írtam, mely a hálózati paraméterek megadásával számol.



2.10. ábra - Az eredő SRS együttható ábrázolása a kvantum csatorna elhelyezkedése szerint

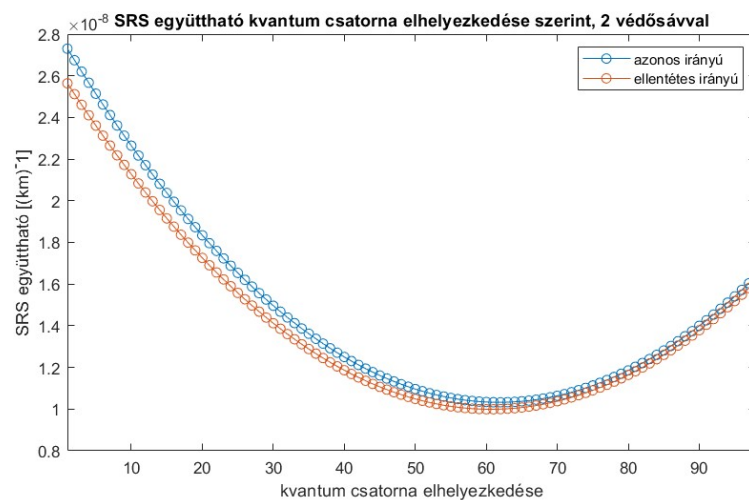
Az eredményként kapott függvény is igazolja a minimumhelyeket. A függvény alakja, és a középponthoz képesti eltolódása azzal magyarázható, hogy a Stokes, és anti-Stokes meredeksége eltérő.

Azonban korábban, az FWM, valamint a 2.6. ábra alapján levont következtetés szerint érdemes kihagyni legalább 2-2 védősávot. Ez alapján átírtam a képlet az SRS együtthatók összegének kifejezésére.

$$\sum \beta(i_q) = k_1 \sum_{j=3}^{i_q-1} j + k_2 \sum_{j=3}^{n-i_q} j \quad (14)$$

$$\sum \beta(i_q) = k_1 \left( \frac{i_q \cdot (i_q - 1)}{2} - 3 \right) + k_2 \left( \frac{(1 + (n - i_q)) \cdot (n - i_q)}{2} - 3 \right) \quad (15)$$

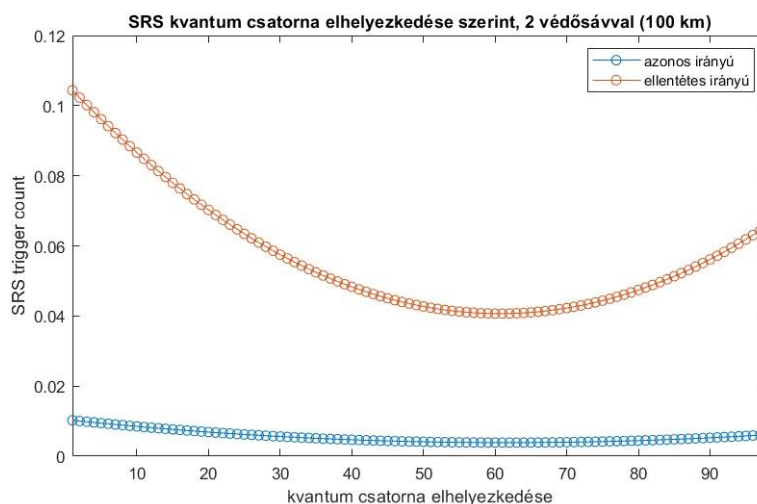
A védősávot tartalmazó képletre is érdemes megnézni, hogy változik-e a kvantum csatornának optimális elhelyezése.



**2.11. ábra – SRS együttható védősávok figyelembevételével**

Védősávok figyelembevételével is a legalacsonyabb SRS együttható érték változatlanul akkor jelentkezik, ha a kvantum csatorna a 62. számú csatorna azonos irányúnál, 61. számú ellentétes irányúnál, így később ezekkel a csatornaelrendezésekkel végeztem a számításaimat és modellezést.

A detektált fotonok számára vonatkozó képlet a szálhossztól függ, a beütés szám kvantum csatorna szerinti függésének ábrázolásához a szálhosszt egy fix értéknek, 100 km-nek választottam, a többi változót a 2.1 pontban meghatározott értékeken tartottam.

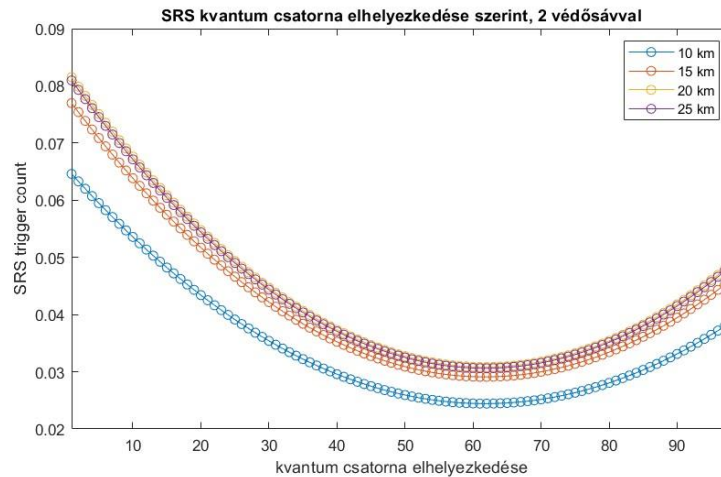


**2.12. ábra – SRS foton beütés száma kvantum csatorna elhelyezkedése függvényében**

Mivel a foton beütés szám számításához csak adott konstans értékekkel szorozzuk meg az SRS együtthatót, így a kvantum csatorna elhelyezkedésére vonatkozó



minimumértékek nem változnak meg. A 2.12. ábra azt is mutatja, hogy ezen az adott távolságon az ellentétes irányú terjedés spontán Raman szórása a jelentősebb. Érdeemes megvizsgálni, hogy a szálhossz változtatása hogyan befolyásolja a spontán Raman szórás hatását.

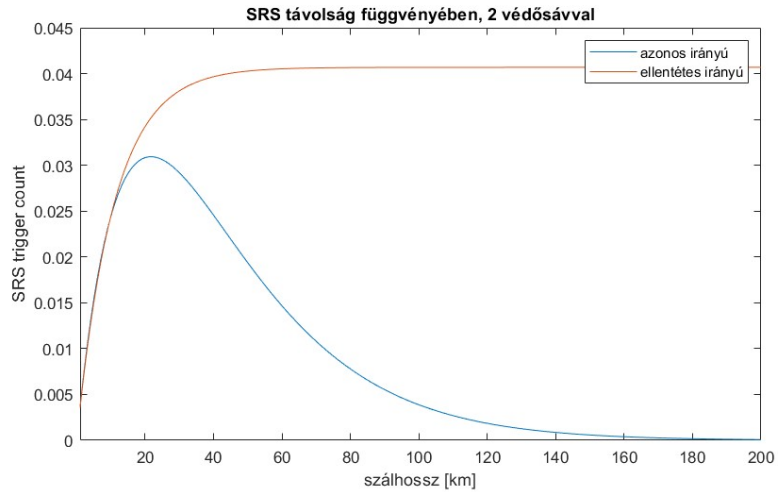


**2.13. ábra – különböző szálhosszok szerinti co-SRS foton beütés ábrázolása kvantum csatorna elhelyezkedése függvényében**

A 2.13. ábra bemutatja különböző szálhosszok beütés szám – kvantum csatorna elhelyezkedés függését. Látható rajta, hogy a 20 km-es (sárga) szálhossz esetén a legnagyobb a foton beütés szám, a 10 km, 15 km, és 25 km esetén kisebb értékek olvashatók le, amiből arra lehet következtetni, hogy 15 km és 25 km között egy lokális, vagy akár globális maximuma van a függvénynek.

## 2.4.2 Távolság szerinti ábrázolás

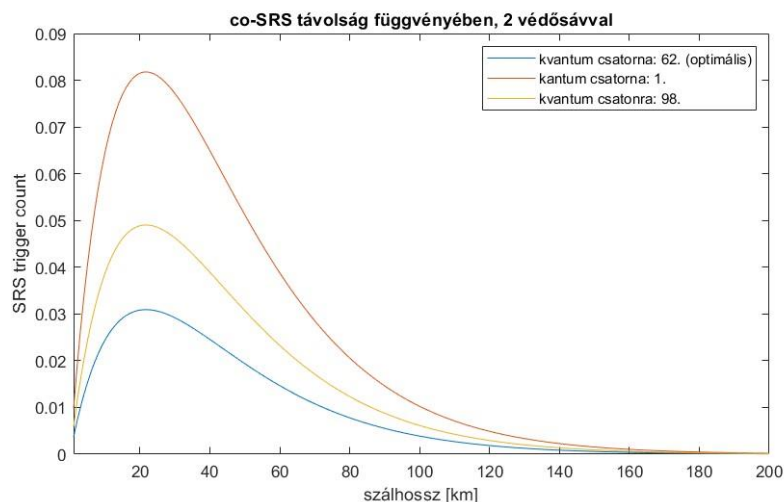
Távolság függvényében való ábrázoláshoz a korábban kiszámított optimális csatorna elrendezést használtam, tehát a kvantum csatorna az azonos irányú terjedésnél a 62. csatorna, az ellentétes irányú terjedésnél a 61. csatorna. Valamint továbbra is a 2-2 védősávot megtartva számoltam.



**2.14. ábra – SRS foton beütés szálhossz szerinti függése, azonos és ellentétes irányú terjedésre**

A 2.14. ábra igazolja az előző pontban leírt feltételezést, miszerint az azonos irányú terjedés esetén a 20 km környezetében lesz a függvénynek maximuma. Az azonos irány esetében az elért globális maximum után a függvény lecseng, és tartani kezd a nullához, ellentétes iránynál azonban tovább növekszik a függvény, és körülbelül 0.04 foton beütés értékre áll be. Ebből arra lehet következtetni, hogy egyértelműen az azonos irányú terjedést érdemes QKD-ra használni, hiszen ott alacsonyabb az SRS hatása, mint az ellentétes irányú esetén.

Emellett megvizsgálható, hogy az SRS együtthatót minimalizáló számítások milyen mértékben befolyásolják az eredményt. Következőkben ábrázoltam, hogy az azonos irányú terjedéshez tartozó optimális kvantum csatorna elhelyezkedéshez (62.) képest milyen mértékben befolyásolja a foton beütés számot, ha például a két szélsőséges esetet, az 1. és 98. csatornát választjuk meg a kvantum csatorna helyének. A 2.11. ábra SRS együttható kvantum csatorna elhelyezkedési függvénye alapján az az eredmény várható, hogy az 1. csatornánál lesz a legnagyobb a beütésszám, de a 98. csatornánál is jelentősen magasabb értékeket kell kapjunk az optimálishoz képest.



**2.15. ábra - SRS foton beütközés szálhossz szerinti függése, azonos irányra, különböző kvantum csatorna elhelyezkedéseknél**

A várak szerint valóban látszik, hogy az optimális csatornaelhelyezés esetén a függvények maximumait nézve a beütések száma szinte harmadára csökken a legrosszabb esethez képest, azaz, ha a kvantum csatorna az 1. csatorna.

Ezzel beigazolódott, hogy ha igaz a V alakú modell, akkor a valóságban számunkra jelentős szakaszon, körülbelül 60/80 km-ig, valóban nagy mértékben számít, hogy a kvantum csatornát a klasszikus csatornához képest hova helyezzük el, és érdemes a kiszámolt optimális csatorna elhelyezést használni.

### 2.4.3 Teljesítmény ábrázolása

Teljesítmény ábrázolásához az eddig használt képletet több lépésben átalakítom. Valós fotonszámot érzékelt fotonszámból úgy számolhatunk, hogy elosztjuk  $\eta$ -vel, a detektor hatásfokával:

$$SRS_{count} = P_0 \cdot z \cdot \beta(i_q) \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \frac{\tau}{h\nu} \quad (16)$$

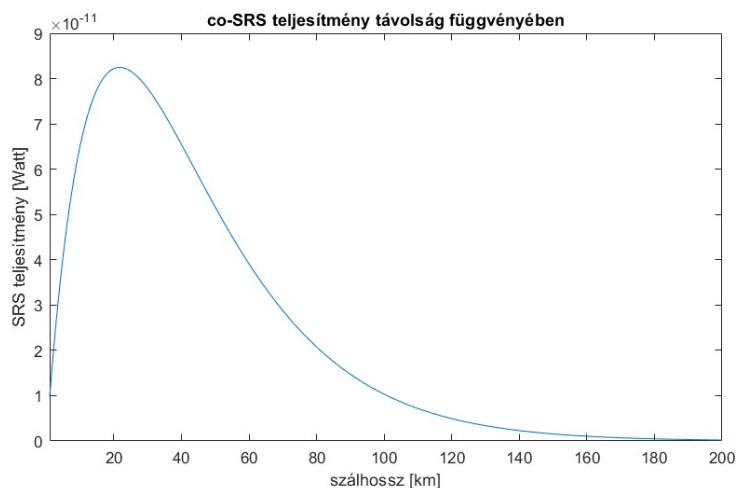
Energia számításához a fotonszámot megszorozzuk egy darab foton átlagos energiájával:

$$E_{SRS} = SRS_{count} \cdot h\nu = P_0 \cdot z \cdot \beta(i_q) \cdot \exp(-\alpha z) \cdot \tau \quad (17)$$

Teljesítmény számításához energiából a fenti képletet kell  $\tau$ -val osztani:

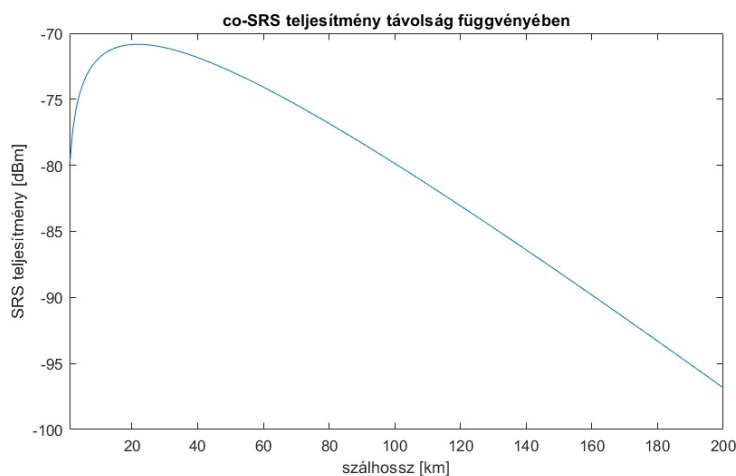
$$P_{SRS} = \frac{E_{SRS}}{\tau} = SRS_{count} \cdot \frac{h\nu}{\tau} = P_0 \cdot z \cdot \beta(i_q) \cdot \exp(-\alpha z) \quad (18)$$

Az így kapott képlet Watt-ban adja meg az eredményt. Ezt ábrázolva, mivel csak konstans értékekkel osztottuk és szoroztuk a foton beütés számot megadó egyenletet, így a függvény alakja nem fog változni.



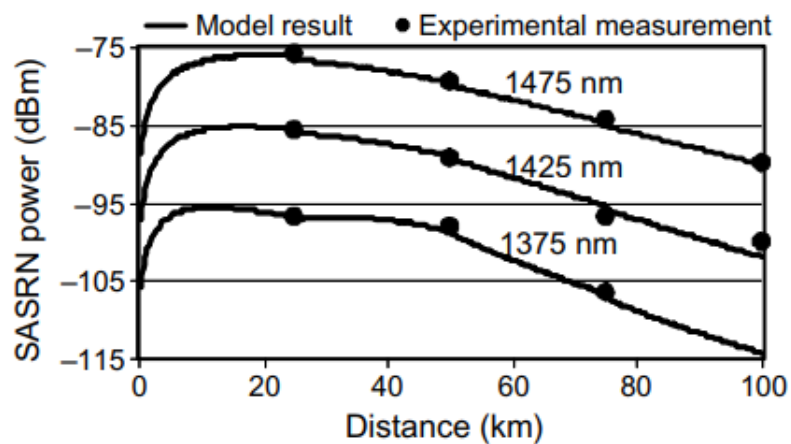
**2.16. ábra – azonos irányú SRS teljesítménye szálhossz függvényében, Watt-ban**

A dBm-be való átváltás után látszik a 2.17. ábra alapján, hogy a függvény maximuma pontosan 22 km-en -70.8365 dBm teljesítményű. A 0-200 km-es tartományon belül az SRS teljesítménye -70.8365 dBm-től -98.8504 dBm-ig terjed. Emiatt a saját mérések elvégzéséhez szükséges lenne olyan teljesítménymérő eszköz, ami képes -100 dBm-ig mérni. Azonban ilyen eszköz nem áll jelenleg rendelkezésre az egyetemi laborban, így a szükséges méréseket egyfoton detektor használatával végeztem el.



**2.17. ábra -azonos irányú SRS teljesítménye szálhossz függvényében, dBm-ben**

Az eredményeimet összehasonlítottam a szakirodalomban található SRS teljesítmény mérésekkel. A [16] cikk mérésével összevetve a vizsgált hálózati paraméterekben jelentkeznek különbségek, mint a csatornák számában, a kvantum csatorna elhelyezkedésében, valamint csak az anti-Stokes szórást mérik. A mérés eredményét a 2.18. ábra mutatja. A fent említett különbségek miatt ebben az esetben kisebb a teljesítmény, azonban jellegre megegyezik a görbe formája, valamint az ábrán látszik, hogy a hullámhossz növelésével nő a teljesítmény is. Tehát a szakirodalomban található mérések igazolták az eredményeimet.

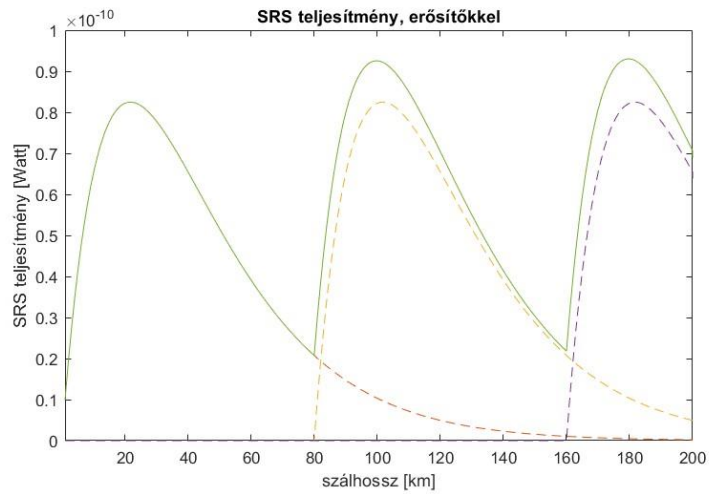


2.18. ábra – SASRN teljesítménye távolság szerint, különböző hullámhosszokra [16]

## 2.4.5 Klasszikus csatornák erősítésének hatása

Előzőekben, az ábráim az SRS hatását 200 km-ig vázolták, azt feltételezve, hogy a klasszikus csatornák ez alatt nincsenek erősítve, így a teljesítményük végig csillapodik. Azonban egy valós hálózatban a jelet ekkora távolságig nem továbbítják optikai erősítő nélkül, így pontosabbá válik a modellem ezt a szempontot is figyelembe véve. Erősítés után a klasszikus csatornáknak nő a teljesítménye, és így az általuk szórt fotonok mennyisége is. Így az EDFA-k implementálásával pontosabb modellt kaphatunk.

Optikai távközlési rendszereknél a tipikus távolság erősítők 60-100 km. [17] Így az eddigi modellt kiegészítettem azzal, hogy a klasszikus csatornák jele 80 kilométerenként, egy ideális erősítést feltételezve, az eredeti bemenő jel teljesítményszintjére emelkedik.



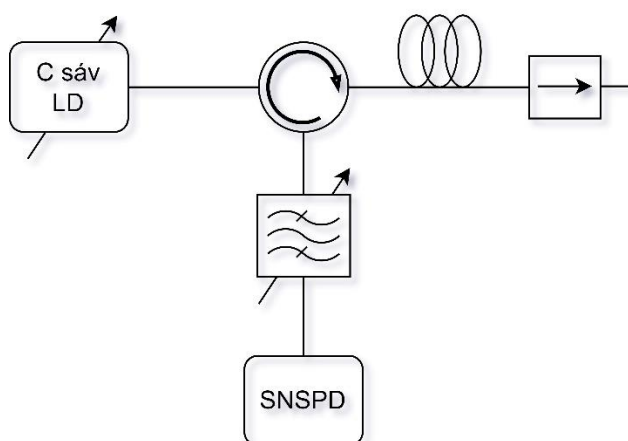
**2.19. ábra – zöld folytonos görbe: SRS hatása 2 optikai erősítő beiktatásával**

Az így kapott 2.19. ábra egy pontosabb modellt ad egy valós optikai hálózatról. Az eredményből látszik, hogy a domináns hatás a felerősített csatornák Raman szórása. Valamint számításba kell venni, hogy a kvantum csatorna nem erősíthető, így az EDFA OADM-el való kikerülése tovább csillapítja a kvantum csatornát.

### 3 Előkészítő mérések

A korábbi pontok eredményei alapján megállapítható volt, hogy az SRS hatása rendkívül kis teljesítményű, így erre való figyelemmel szükséges összeállítani a mérési elrendezést. Az SRS zajának mérését egyfoton detektorral végeztem el, és ahhoz, hogy kizárólag a szórt fotonokat mérje, fontos, hogy a megfelelő elnyomású és sávszélességű szűrőt használjak. Az azonos irányú terjedés méréséhez nem álltak rendelkezésre megfelelő eszközök, szűrők, így az ellentétes irányú terjedés mérésével igazolom az elméleti modell helyességét.

#### 3.1 Mérési elrendezés tervezése



3.1. ábra – SRS mérés blokkváz

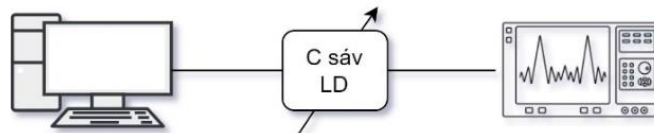
Az ellentétes irányú SRS mérését circulátor használatával valósítottam meg. A lézer a klasszikus csatornát reprezentálja, ami a circulátorról a több kilométeres optikai szálon keresztül terjed tovább. Az ellentétes irányba szóródó fotonokat a circulátor a fotondetektor irányába továbbítja, a hangolható szűrő az elméleti kvantum csatorna hullámhosszára van beállítva, így a fotondetektor csak azokat a fotonokat méri, amik az adott kvantum csatorna frekvenciatartományába esnek. A modellem és számolt eredmények igazolására többféle csatorna elrendezéssel is végeztem mérést.

A hangolható lézerrel 96 különböző csatornafrekvencia állítható be, ezek lemérésével igazolható a korábbi állítás, miszerint az SRS eloszlása a C-sávban V alakot követ. A távolságtól való függést a különböző szálhosszokkal való méréssel igazoltam.

## 3.2 Felhasznált eszközök mérése

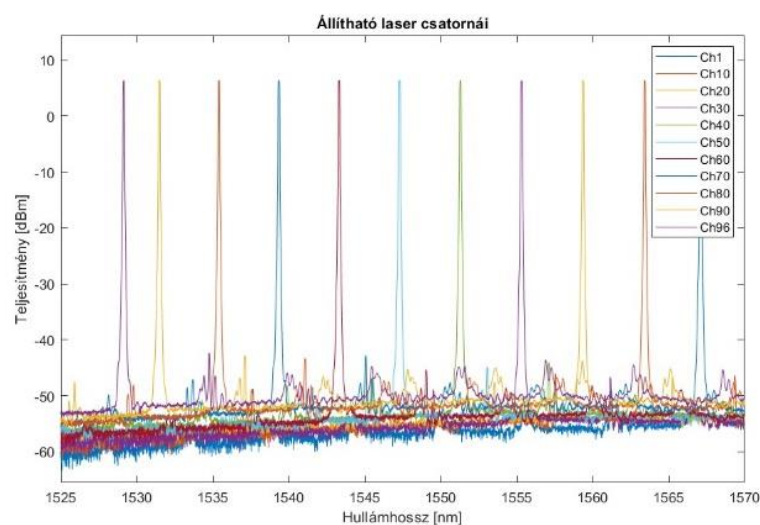
A fenti mérési elrendezés összeállítása előtt fontos volt az eszközöket egyenként lemérni, annak érdekében, hogy megbizonyosodjak abban, hogy csak a kijelölt kvantum csatorna hullámhossztartományába eső szórt fotonokat érzékeli majd a fotondetektor. Ehhez szükséges megmérni egyes műszerek zaját, valamint, hogy a szűrőnek, izolátornak és cirkulátornak mekkora a csillapítása. Ezeknek az értékeknek a megvizsgálásával állapítható meg hogy a mérési elrendezés megfelelő-e, vagy szükséges további szűrő hozzáadása.

### 3.2.1 Hangolható lézer



3.2. ábra – hangolható lézer mérésének blokkváza

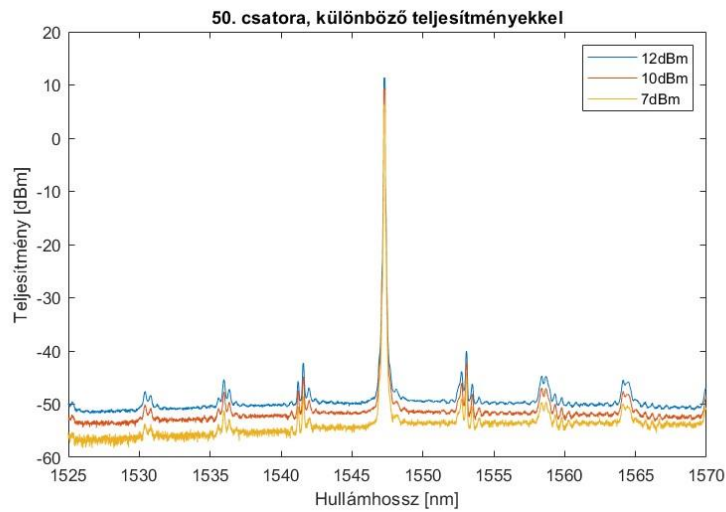
A hangolható lézert PC-n irányítva optikai spektrumanalizátorral mértem. A lézert egymástól 50 GHz-re lévő 96 csatorna közül választva lehet beállítani. Először 11 csatornát mértem le, az elsőt, az utolsót, azaz a 96.-at, valamint köztük minden 10.-et, mindet azonos teljesítményszinten, 7 dBm-en. [19] A lementett mérési eredményeket közös grafikonon ábrázoltam.



3.3. ábra – A hangolható lézer spektrumképe, 11 különböző DWDM csatorna esetében.



Majd egy csatornát kiválasztva, az 50.-et, megvizsgáltam, hogy a teljesítmény változtatásával, hogy változik a zajszint.

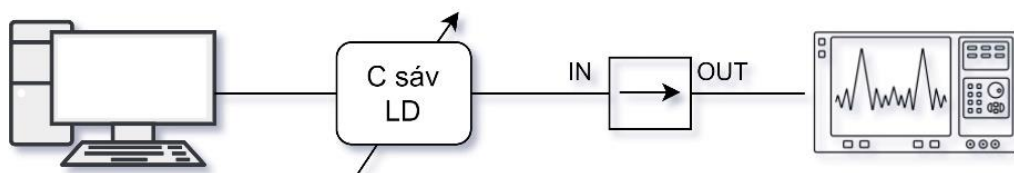


**3.4. ábra – A hangolható lézer optikai spektruma különböző kimeneti teljesítmény szintek esetében.**

Továbbiakban is a hangolható lézer által meghatározott frekvenciájú csatornákra fogok hivatkozni. 1. csatorna 191.3 THz-es, 50 GHz-enként nő, egészen a 96. csatornáig. [19]

### 3.2.2 Izolátor

Az optikai izolátor egy passzív eszköz, amely használatával a fény csak egy irányba terjedhet. A mérésnél az izolátor funkciója az, hogy meggátolja, hogy az optikai szál végéről reflektált fotonok befolyásolják a mérést. [18]



**3.5. ábra – izolátor csillapításának mérésének blokkváza**

Az előző pontban leírt mérést azzal egészítettem ki, hogy a lézer és a spektrumanalizátor közé beiktattam az izolátort. Két féle módon mértem le, az izolátor csillapítását, blokkolását. Először a lézert az izolátor bemenetére, a spektrumanalizátort a kimenetére csatlakoztatva, majd fordítva.

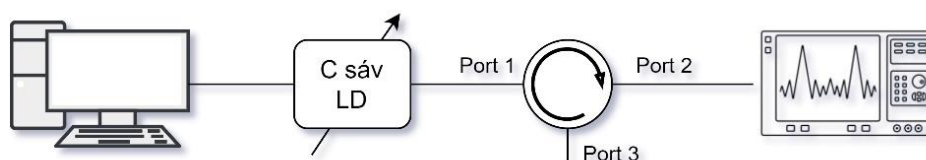
	Izolátor nélkül	Izolátorral	Izolátor fordítva	Beiktatási csillapítás	Izoláció
<b>1. csatorna</b>	6.31 dBm	5.91 dBm	-34.55 dBm	-0.4 dB	-40.86 dB
<b>50. csatorna</b>	6.36 dBm	5.96 dBm	-55.64 dBm	-0.4 dB	-62 dB
<b>96. csatorna</b>	6.31 dBm	5.93 dBm	-35.92 dBm	-0.38 dB	-42.23 dB

**2. táblázat – Izolátor mérése**

A két irányban mért értékeket az előző pontban megmért, izolátor nélküli értékekből kivonva megkaptam, hogy melyik irányba milyen mértékű az izolátor csillapítása. Látható, hogy a beiktatási csillapítás minden csatorna esetén nagyságrendileg 0,4dB. Az izoláció azonban a sávközépi 62dB-es értékéről a hullámhossz sáv szélén 40-42dB-re csökken. Ebből arra lehet következtetni, hogy a két szélső csatorna nincs benne az izolátor optimális működési hullámhossztartományában. Azonban előzetes számításaim alapján 40dB izoláció is elegendő a mérési összeállításomban.

### 3.2.3 Cirkulátor

A cirkulátor egy általában 3 vagy 4 port-tal rendelkező, jel irányítására szolgáló passzív eszköz. [18]



**3.6. ábra – cirkulátor csillapításának mérésének blokkváza**

A lézer és a spektrumanalizátor közé csatlakoztattam a cirkulátort, három különböző módon. Az SRS mérési elrendezésnél úgy szerepel a cirkulátor, hogy a Port1-re a hangolható lézer, Port2-re az optikai szál, Port3-ra a hangolható szűrő és fotondetektor csatlakozik. Emiatt fontos megmérni egyrészt, azt, hogy mennyit csillapít Port1-ről Port2-re a lézer jelén, valamint Port2-ről Port3-ra az ellentétes irányba szóródó fotonokon. Másrészt azt is meg kell vizsgálni, hogy Port1-ről Port3-ra mennyit blokkol.

	Cirkulátor nélkül	BE: Port1 Ki: Port2	BE: Port2 KI: Port3	BE: Port1 KI: Port3
1. csatorna	6.31 dBm	5.02 dBm	4.46 dBm	-46.13 dBm
40. csatorna	6.35 dBm	5.02 dBm	4.47 dBm	-43.13 dBm
50. csatorna	6.36 dBm	4.99 dBm	4.53 dBm	-46.17 dBm
60. csatorna	6.38 dBm	5.07 dBm	4.53 dBm	-44.49 dBm
96. csatorna	6.31 dBm	4.92 dBm	4.43 dBm	-47.93 dBm

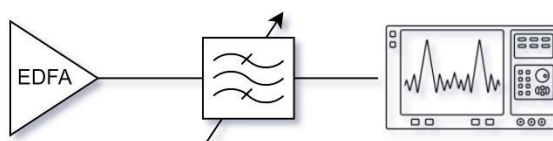
3. táblázat – Cirkulátor mérése

Egyes oszlopokat a cirkulátor nélküli értékekből kivonva megkapható az egyes Port-ok csillapítása. Port1-ről Port2-re, valamint Port2-ről Port3-ra 1-2 dB a csillapítás, míg Port1-ről Port3-ra 50 dB körüli, ami kellően nagy csillapítás, ahhoz, hogy ne befolyásolja a mérés végeredményét. Az izolátorral ellentétben ennél az eszköznél nincs jelentős eltérés a különböző csatornák csillapításai között.

	BE: Port1 Ki: Port2	BE: Port2 KI: Port3	BE: Port1 KI: Port3
1. csatorna	-1.29 dB	-1.85 dB	-52.44 dB
40. csatorna	-1.33 dB	-1.88 dB	-49.48 dB
50. csatorna	-1.37 dB	-1.83 dB	-52.53 dB
60. csatorna	-1.31 dB	-1.85 dB	-50.87 dB
96. csatorna	-1.39 dB	-1.88 dB	-54,24 dB

4. táblázat – Cirkulátor csillapítása

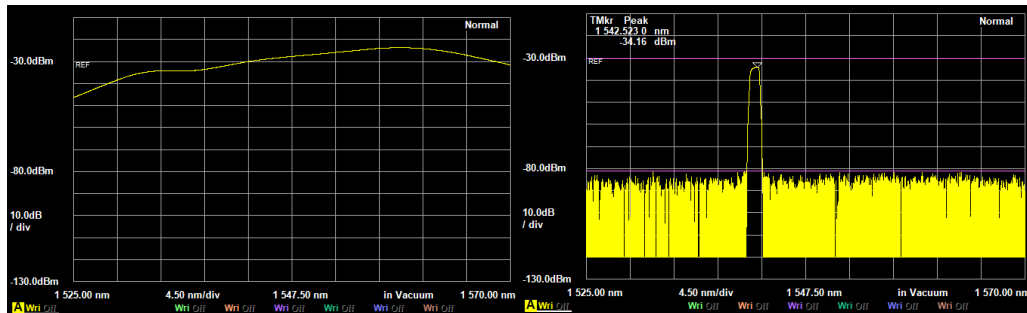
### 3.2.4 Hangolható sáváteresztő szűrő



3.7. ábra – hangolható szűrő mérésének blokkváza

A hangolható szűrő méréséhez EDFA-t használtam széles sávú optikai zajforrásként. Először a szűrő nélküli zajszintet mértem le, hogy majd ehhez hasonlítva megállapítható legyen a szűrő valós csillapítása.

A 3.8. ábra bal képe mutatja az EDFA spektrumanalizátorral kirajzolt teljesítményszintjét, ami hullámhossztól függően kis mértékben változik, átlagosan -30 dB-es.



**3.8. ábra – bal: EDFA teljesítménye (hangolható szűrő nélkül), jobb: hangolható szűrő karakterisztikája**

Majd az EDFA és a spektrumanalizátor közé csatlakoztattam a hangolható szűrőt, hogy megvizsgáljam a működését. A 3.8. ábra jobb oldali képén látszik az így kapott spektrum ábra, 62. csatorna hullámhosszára állítva, 1.5 nm-es sávzélességgel. Leolvasható, hogy a -30 dBm-es teljesítményszintet -80 dBm alá, tehát 50 dB-el csillapította. Az első mérésekhez a 64. csatornára, 0.5 nm-es sávzélességgel állítottam be, hogy minél kisebb legyen az áthallás. A szűrőt mindenképp a spektrumanalizátorral volt szükséges beállítani, mivel csak manuálisan mikrométerekkel lehet hangolni. [21]

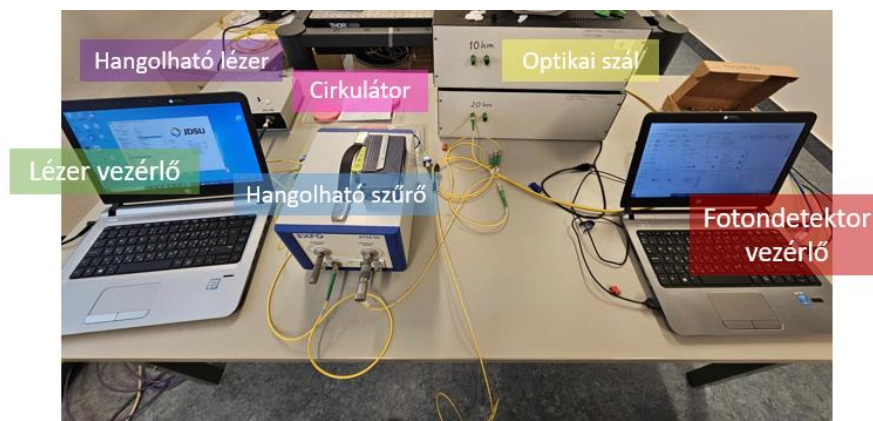
## 4 SRS mérése

A 3.1. ábra alapján a laborban összeállítottam a mérési elrendezést, aminek során figyeltem a csatlakozók megfelelő tisztítására, mivel ennek hiánya jelentős eltérést jelenthet a mérésekben. Alap mérések elvégzéséhez a 20 km hosszú optikai szálát használtam, majd ezt a távolságtól való függés mérésénél változtattam. Az egyfoton detektor [20] és a lézer [19] vezérléséhez, monitorozásához szükség volt laptopon lévő kezelő felületre.

Annak ellenőrzésére, hogy valóban alkalmas az elrendezés a Raman szórás mérésére, le kell ellenőrizni, hogy a rendszer, a lézer zaja nem lesz-e dominánsabb a Raman szórásnál, tehát, hogy tényleg a szórt fotonokat mérem-e.

A szűrő a 64. csatorna hullámhosszára hangoltam, a sáv szélességet 0.5 nm-re állítottam, a cirkulátorhoz 20 km-es optikai szálát csatlakoztattam. Kikapcsolt lézer esetén, 1 másodperces időablakban 3500 fotont mért a detektor. Ez a mérőrendszer zajszintje, ami a környezetből becsatlódó fotonokat és a detektor saját zaját tartalmazza. Mivel a hangolható lézer legalacsonyabb beállítható teljesítménye 7 dBm, a lézer kimenetére csatlakoztattam egy 10 dB-s csillapítót, hogy a detektor biztosan ne telítődjen túl. A hangolható lézert az 1. csatornára (191.3 THz) állítva másodpercenként 2.6 millió fotont mértem. Megismételtem a mérést a 20km-es optikai szálát leválasztva, hogy megbizonyosodjak a lézer jele milyen mértékben jut át a cirkulátor 2-es pontjára. Az ebben az esetben másodpercenként mért 40000 foton igazolta, hogy az előző mérés esetében az optikai szálból visszaérkező fotonok domináltak. Tehát nincs szükség a lézer után opcionálisan betervezett optikai szűrőre.

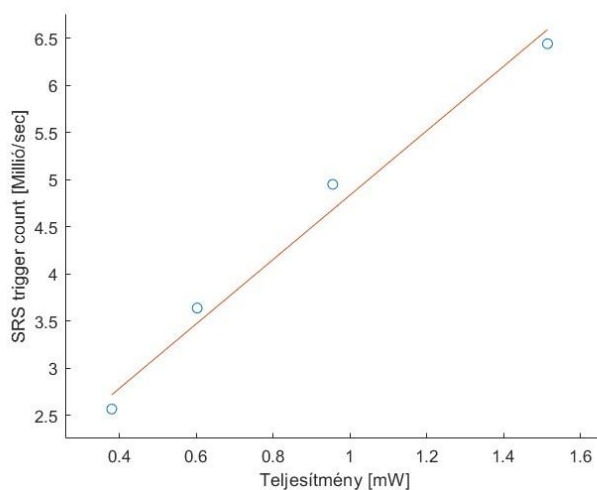
Emellett megvizsgáltam azt is, hogy szükség van-e a szál végén az izolátorra. Elvégeztem a korábban leírt 20 km-es szálon végzett mérést, ebben az esetben az izolátor nélkül. Az eredményben így nem volt megfigyelhető jelentős eltérés, ami annak tudható, hogy az optikai szál APC csatlakozója jó minőségű, és így alacsony a reflektálódott fotonok száma. Emiatt a további méréseket izolátor használata nélkül végeztem, a végső mérési elrendezést a 4.1. ábra mutatja.



4.1. ábra – mérési elrendezés

## 4.1 SRS bemeneti optikai teljesítménytől való függése

A használt hangolható lézer [19] teljesítményét 7 és 13 dBm között lehet változtatni. Ebben a tartományban négy értéket kiválasztva, 7 dBm, 9 dBm, 11 dBm és 13 dBm, lemértem, hogy hogyan változik a mért fotonok száma. Az SRS-ből szórt fotonok számát leíró képlet szerint a teljesítménnyel egyenesen arányos a fotonszám. Az optikai szálba jutó teljesítmény megadásához figyelembe vettem, hogy a lézer jelét a csillapító és a cirkulátor csökkenti.

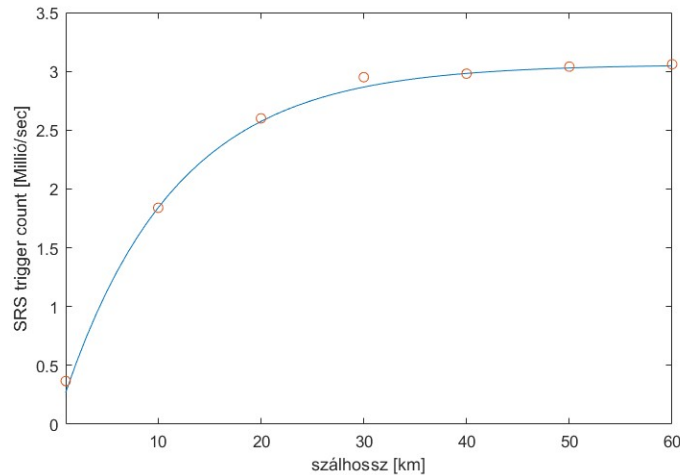


4.2. ábra – SRS teljesítménytől való függése, kék körök: mérési eredmények, piros: illesztett egyenes

A mért pontok ábrázolása után a lineáris függés bizonyítására egyenest illesztettem a pontokhoz. Kis eltérések látszódnak, amiket okozhattak mérési pontatlanságok.

## 4.2 Optikai szál hosszának hatása

Az egyetemi laborban a következő hosszúságú rendelkezésre álló optikai szálakat használtam fel a Raman szórás távolságtól függésének ábrázolására: 1 km, 10 km, 20 km és 30 km. Ezen felül hosszabb szálszakaszokat is alkottam ezeket egymás után összekötve. Továbbra is az első csatorna hullámhosszán, valamint 7 dBm-en használva a lézert, a szűrő 64. csatorna hullámhosszán végeztem a mérést.

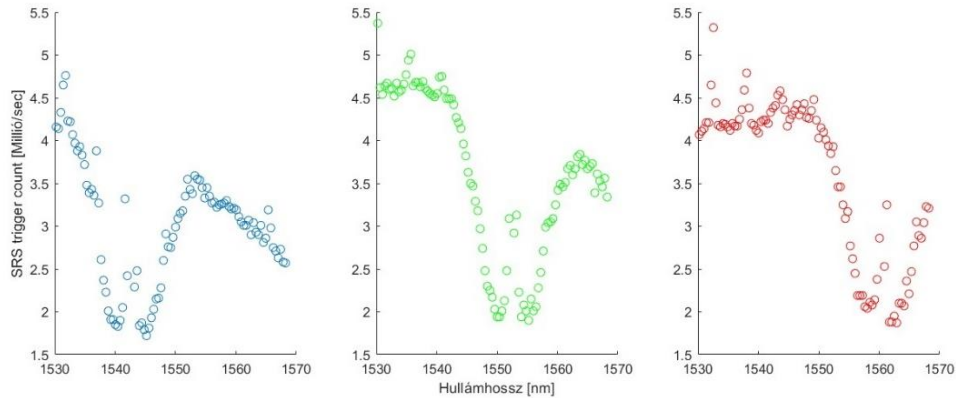


4.3. ábra – Piros körök: mért eredmények, kék: elméleti modellből kapott görbe átskálázva

A 4.3. ábra mutatja a mért eredményeket (piros körök), és a rájuk illesztett görbét. A görbe az ellentétes irányú SRS fotonszám képletéből kapható, ami a 2.14. ábra is látható. Mivel a korábbi modellezés során nem a később elvégzett mérés paramétereit használtam, így nagyságrendi eltérések vannak a kapott értékek között, ezért a 2.14. ábra görbáját a mért értékekhez átskálázva ellenőriztem le, hogy a távolság függvényében megfelelő mértékben változtak-e. A mérési pontok valóban illeszkednek a görbére így megerősíthető a felhasznált matematikai képlet helytállósága.

## 4.3 Hullámhossz változtatásával

A hangolható szűrőt továbbra is a 64. csatorna hullámhosszára, azaz 1542.8 nm-re állítva használtam, reprezentálva a kvantum csatornát. A hangolható lézernak végig mértem az egyes csatornáit, amik a klasszikus csatornákat helyettesítik. A 64. csatornán kívüli további 95 darab csatorna lemérése után a hangolható szűrőt átállítottam a spektrumanalizátor használatával a 40. csatornára, 1552.4 nm, majd a 20. csatornára, 1560.5 nm, és elvégeztem ugyanezeket a méréseket.



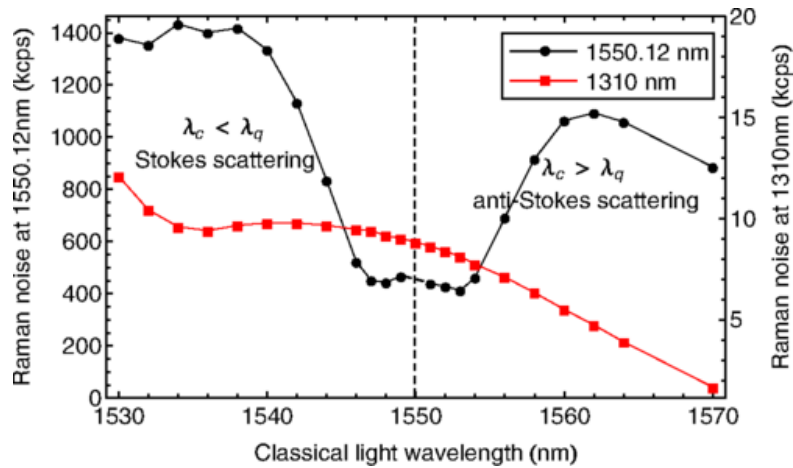
**4.4. ábra – Kék: elméleti kvantum csatorna 64., zöld: kvantum csatorna 40., piros: kvantum csatorna 20.**

A 4.4. ábra mutatja a mért értékeket, és látható, hogy nem tisztán V alak a Raman szórás eloszlása, mint ahogy azt a 2.4. ábra, [10] cikk mérése mutatta. Azokról a csatornákról, amelyek a szűrőn beállított hullámhosszhoz közeli, kimagaslóan magasak az értékek, valószínű, hogy a lézer áthallása miatt, így ezek mérési pontatlanságként elhanyagolhatók. Azonban ezeket figyelmen kívül hagyva se lesz igaz a V alak a teljes C sávra a méréseim alapján, csak egy részére. A szűrt csatorna körüli nagyjából 50 csatornára (előtte és utána is körülbelül 25-ra) állítható, hogy igaz a V alak, alacsonyabb hullámhosszon szinte konstanssá laposodik, magasabb hullámhosszon letörés tapasztalható. Ez a tendencia 2.4. ábrán is megjelenik, azonban csak a C sávon kívül, ez a különbség magyarázható azzal, hogy nagyobb hullámhossztartományon, több sávot vizsgálva végezték el a mérés és a C sávban jelentősen kevesebb a mérési pont. Az is megfigyelhető, hogy a V nem a 0-ból indulna a két egyenes meghosszabbításával, hanem magasabb értékről.

A [11] cikk, 2.6. ábra összevetve már hasonló eredmények tapasztalhatók a méréseimmel. Bár az említett cikk teljesítményt mér, ami decibelben van ábrázolva, tendencia szempontjából megfigyelhető, hogy ennél a mérésnél szintén még a C sávon belül elkezd a Raman szórás teljesítménye ellaposodni, letörni.

További cikkeket vizsgáltam meg, hogy igazoljam, hogy a Raman szórás nem pontosan egy V alakot követ. A [15] cikk alábbi mérési eredménye (4.5. ábra) is ezt a megállapítást igazolja. A mérést hasonlóan végezték el, mint ahogyan az általam összeállítottnál leírtam. Egy hangolható lézerről szórt fotonokat mértek végig 1530 nm-től 1570 nm-ig tartó tartományban egy APD fotondetektorral, egy 1550-es, valamint egy 1310 nm-es közép hullámhosszú szűrővel.





4.5. ábra – C sáv (fekete) és O sávban (piros) mért SRS összehasonlítása [15]

A fenti C sávban mért értékek jellegre megegyeznek az általam mértekkel. A szűrő közép hullámhossza mellett mért értékek elhanyagolásával itt is igaz, hogy minkét oldalon körülbelül 25 csatornáig, azaz 10-10 nm-ig ( $25 \cdot 0.4$  nm) igaz a V alak, tehát hogy távolodva egyre nő az SRS hatása. Majd ezután alacsonyabb hullámhosszokon konstanssá válik, magasabb hullámhosszokon csökkenni kezd a szórt fotonok száma, pontosan úgy, ahogy az általam végzett mérésnél. Így ez a forrás is igazolja, hogy a V alakú modell nem megfeleltethető az egész C sávra.

## 4.4 Eredmények kiértékelése

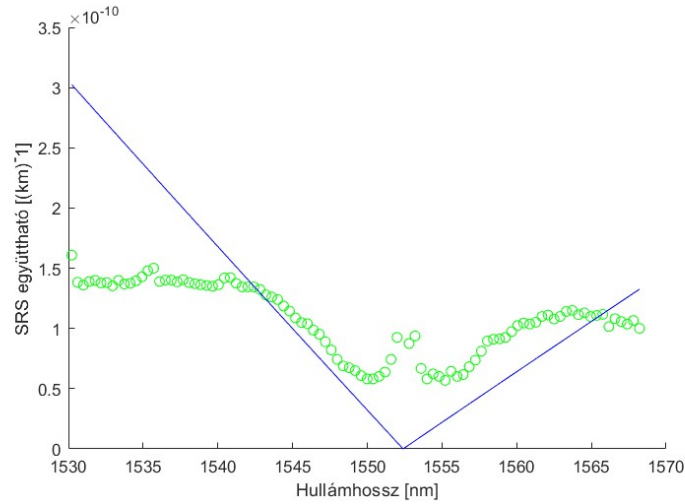
Leellenőrizhető, hogy valóban a V alakos számítás szerinti 62. csatorna körül lesz-e a minimális a Raman szórás egy DWDM rendszerben, ha összeadjuk a különböző csatornákon külön-külön mért fotonszámokat. Így megkapjuk azt az értéket, amit egy 96 csatornás rendszerben mértünk volna, 1 kvantum csatornával, és 95 klasszikus csatornával.

	20. csatorna	40. csatorna	64. csatorna
<b>Összes fotonszám [Millió/sec]</b>	341.7	342.36	283.25

5. táblázat – Egyes csatornákra mért összegzett fotonszámok

Az eredményekből kiolvasható, hogy valóban a 64. csatorna összeadott fotonszáma a legkisebb a három mérés közül, azonban a 20. és 40. között nincs jelentős különbség. A 2.10. ábra mutatja, hogy V alakú eloszlásból, és az adott meredekségekből

kiindulva hogyan kéne a csatornaelrendezés szerint változnia az SRS együtthatónak, amivel egyenesen arányos a szórt fotonok száma. Az ábrán látszik, hogy a 20. csatornáról a 40.-re körülbelül 2/3-ára kéne csökkenni az SRS hatásának, ami a mérésnél nem történt meg. Ez felveti a kérdést, hogy valóban helyes-e az a feltevés, hogy pontosan V alakot követ az SRS együttható eloszlása a C sávon belül, hisz a 4.4. ábra látszó mérési eredményeim, valamint a 4.5. ábra se ezt mutatja.



4.6. ábra – szűrő 40. csatornán, zöld: mért pontok, kék: V alak modell

A fenti ábránál a V alakhoz a korábban is felhasznált [9] cikkből számított meredekséget használtam. A mért fotonszámot az ellentétes irányú SRS képletével (2.1 pont alatt) számoltam át SRS együtthatóvá. Ehhez szükség volt a fotondetektor paramétereire, mint a detekciós határfokára, amit az adatlapjából lehet megtudni. [20]

$$\beta(i_q) = \frac{SRS_{counter} \cdot 2\alpha \cdot h\nu}{P_0 \cdot [1 - \exp(-2\alpha z)] \cdot \eta \cdot \tau} \quad (19)$$

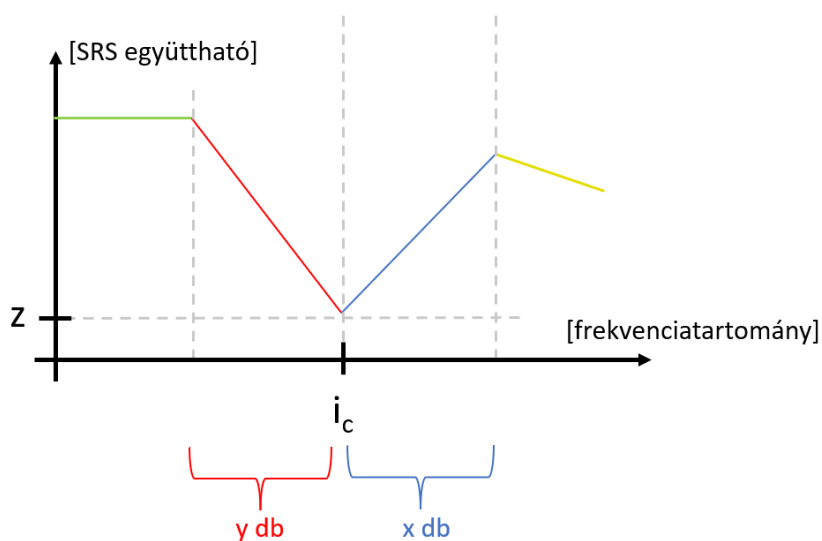
ahol:  $\alpha=0.2\text{dB/km}$ ,  $z=20\text{km}$ ,  $P_0=0.0005\text{W}$ ,  $\eta=95\%$ ,  $\tau=1\text{s}$ ,  $h\nu=1.3 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ .

A mért értékek, és a várt V alak összehasonlításából (4.6. ábra) is látszik, hogy nem teljesen illeszkednek egymáshoz. Ebből felmerül, hogy így a valóságban más lesz-e az optimális csatorna elrendezés, mint a korábban számolt érték. Várhatóan akkor lesz a minimális az SRS együttható, ha a kvantum csatorna minél kisebb hullámhosszon van, mivel megfigyelhető, hogy a nagyobb hullámhosszú csatornákról szóródott fotonok száma körülbelül 25 csatorna után csökkenni kezd. Azonban, ahhoz, hogy ezt a feltevést bebizonyítsam, szükséges, hogy a V alakú modellt kiegészítsem a mért eredmények alapján, hogy így pontosabb számításokat végezhessenek.

## 5 A módosított modell

Először az új, módosított modell meghatározásához azt írtam fel, hogy egy adott klasszikus csatornáról a frekvenciatartományban hogyan fog kinézni az SRS együttható eloszlása. Mivel frekvencia, és nem hullámhossz szerint ábrázolom, mint a mérésnél, ezért az eloszlás ábrája fordított, tengelyesen tükrözve lenne. Azonban a mérésnél a kvantum csatornára néztem, hogy egyes klasszikus csatornákból milyen mértékű a szóródás, és nem azt, hogy egy darab klasszikus csatornából hogyan néz ki a szórt fotonok eloszlása, tehát ez újra az ábra fordítását eredményezné, így visszatérve az eredetire.

A mérési eredmények (4.4. ábra) alapján 4 részre osztottam az eloszlást, amit az 5.1. ábra különböző színekkel jelöltem. A V alak a  $k_3$  meredekségű piros, és a  $k_2$  meredekségű kék részekre érvényesül, mindkét részre egy meghatározott csatornaszámig.  $X$  darab csatornával a vizsgált klasszikus csatorna után a sárga részen a szórás elkezdi csillapodni,  $k_1$  meredekséggel.  $Y$  darab csatornával a klasszikus csatorna előtt az SRS hatása konstanssá válik, amit a zöld rész jelöl.



5.1. ábra – A módosított modell szerinti SRS eloszlás frekvenciatartományban

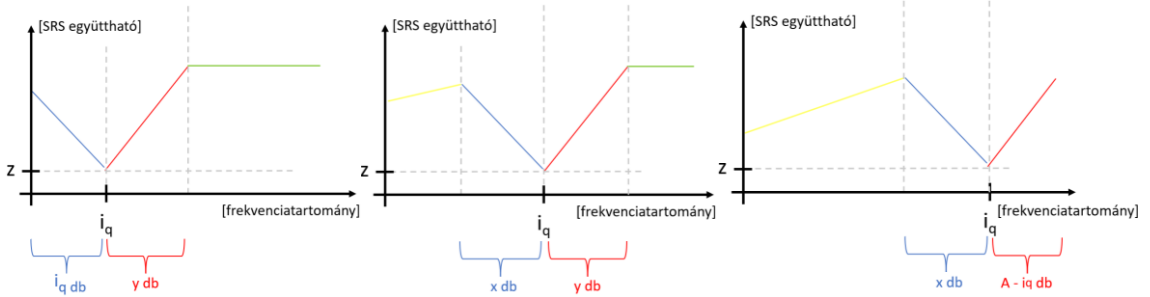
Mivel a mért eredményekről is látszott, hogy az itt kék és pirossal jelölt lineáris szakaszok nem a nullában metszenék egymást, így ezt a függőleges eltolást  $z$ -vel jelöltem.

## 5.1 Képlet kiegészítése

A fent említett változók, meredekségek, csatornaszámok függenek az adott mérési elrendezéstől, csatornák távolságától, valamint a meredekség attól is, hogy azonos vagy ellentétes irányú a szóródás, így először paraméteresen végzem el a V alak által meghatározott képlet kiegészítését. Először meghatároztam, hogy a kvantum csatorna a klasszikus csatornához képest elhelyezkedése szerint mennyi lesz az egy klasszikus csatornából származó SRS együttható. A fenti 5.1. ábra alapján a képletet is 4 részre osztottam, és a következőképpen fejeztem ki egyes részeket:

$$\beta(i_q) = \begin{cases} k_3 \cdot y + z, & i_q < (i_c - y) \\ (i_c - i_q) \cdot k_3 + z, & (i_c - y) \leq i_q \leq i_c \\ (i_q - i_c) \cdot k_2 + z, & i_c \leq i_q \leq (i_c + x) \\ k_2 \cdot x - (i_q - i_c - x) \cdot k_1 + z, & (i_c + x) < i_q \end{cases} \quad (20)$$

Mivel több csatornából áll egy DWDM hálózat, a csatornák számát az A változó jelöli, összegezni kell az klasszikus csatornák SRS együtthatóit. Az összegzést 3 esetre osztottam, mivel, ha a kvantum csatorna sorszáma x-nél kisebb, vagy A-y-nál nagyobb, akkor csak 3 tagból fog állni az összegképlet, és változik az egyes tagoknak a határértékei.



5.2. ábra – SRS együttható összegzésénél figyelembe vett 3 eset

A fenti ábrák mutatják az eseteket, amire szükséges szétbontani az összegképletet. Az eddig leírt mérési eredményekből származó következtetéseket összegeztem az alábbi képletben:

$$\sum \beta(i_q) = \begin{cases} \sum_{j=3}^{i_q-1} (k_2 \cdot j + z) + \sum_{j=3}^y (k_3 \cdot j + z) + (k_3 \cdot y + z) \cdot (A - i_q - y), & i_q \leq x \\ \sum_{j=1}^{i_q-x-1} (k_2 \cdot x - k_1 \cdot j + z) + \sum_{j=3}^x (k_2 \cdot j + z) + \sum_{j=3}^y (k_3 \cdot j + z) + (k_3 \cdot y + z) \cdot (A - i_q - y), & x < i_q < A - y \\ \sum_{j=1}^{i_q-x-1} (k_2 \cdot x - k_1 \cdot j + z) + \sum_{j=3}^x (k_2 \cdot j + z) + \sum_{j=3}^{A-i_q} (k_3 \cdot j + z), & A - y \leq i_q \end{cases} \quad (21)$$

Ahol az 'A' a csatornák száma,  $k_1$ ,  $k_2$  és  $k_3$  a 5. szekcióban meghatározott szakaszok meredekségei, és az  $x$  és  $y$  az adott szakaszok méretét meghatározó csatornaszámok.

## 5.2 Változók meghatározása

A változók meghatározása előtt fontos kijelenteni, hogy ezek az értékek az ellentétes irányú szórásra, valamint 50 GHz-es csatornatávolságra vonatkoznak, egy 96 csatornás rendszernél. Emellett a  $z$  változót nagyban befolyásolják az adott mérési elrendezésből adódó csillapító, és zaj tényezők, így ez az érték változhat mérésenként.

Elsőként azt vizsgáltam meg az elvégzett mérések alapján, hogy az egyes szakaszhatárok meddig tartanak, és ez alapján az  $x$  és  $y$  változót határoztam meg. Majd a kiugró pontokat eltávolításával az egyes mérési pontokat összekötő egyeneseket átlagoltam a különböző szakaszokra nézve, így megkapva a fotonszámból SRS együtthatóba átváltott  $k_1$ ,  $k_2$  és  $k_3$  változókat. A három mérésnél a változókhoz kapott értékeket összevetve határoztam meg a végső számokat.

A  $z$  meghatározásához a mérési pontokhoz kiszámoltam az 5.1 pontban leírt képletből a  $z$ -t kihagyva a hozzá tartozó elméleti értékeket. Majd a  $z$  nélkül számolt, és a mért értékek átlagos eltérése adta meg a  $z$  változót.

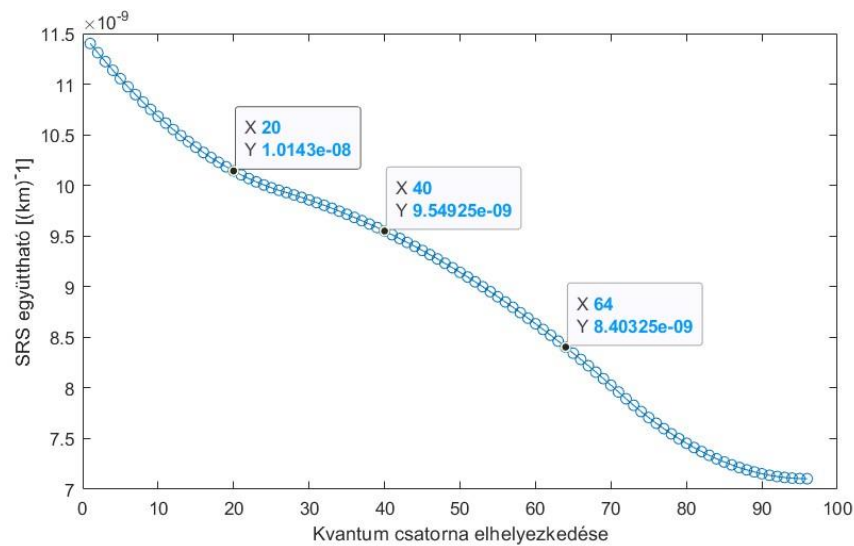
Az alábbi táblázatba foglalt értékek jöttek ki a fent meghatározott módszerekkel, és továbbiakban a kiegészített modellemnél is ezeket fogom felhasználni.

$k_1$ [km <sup>-1</sup> ]	$k_2$ [km <sup>-1</sup> ]	$k_3$ [km <sup>-1</sup> ]	$z$ [km <sup>-1</sup> ]	$x$ [db]	$y$ [db]
$1 \cdot 10^{-12}$	$2.75 \cdot 10^{-12}$	$3.75 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-11}$	26	25

6. táblázat – A módosított képlet változóihoz meghatározott értékek

### 5.3 Továbbfejlesztett modell eredményei

Ahhoz, hogy az ideális csatornaelrendezést a kiegészített modell szerint újra meghatározzam, és ábrázoljam a kvantum csatorna elhelyezkedése szerinti SRS együtthatót, az 5.1 pontban leírt összegképletet át kell alakítani olyan formátumba, hogy ne tartalmazza a változót, tehát  $i_q$ -t, határértékben, mivel a MATLAB ilyen formában nem tudja feldolgozni. Ezt az átalakítást a számtani sorozat összegképletével tettem meg. A korábbi modellezéssel ellentétben itt 96 csatornával fogok számolni 98 helyett, hogy illeszkedjen az elvégzett méréshez.

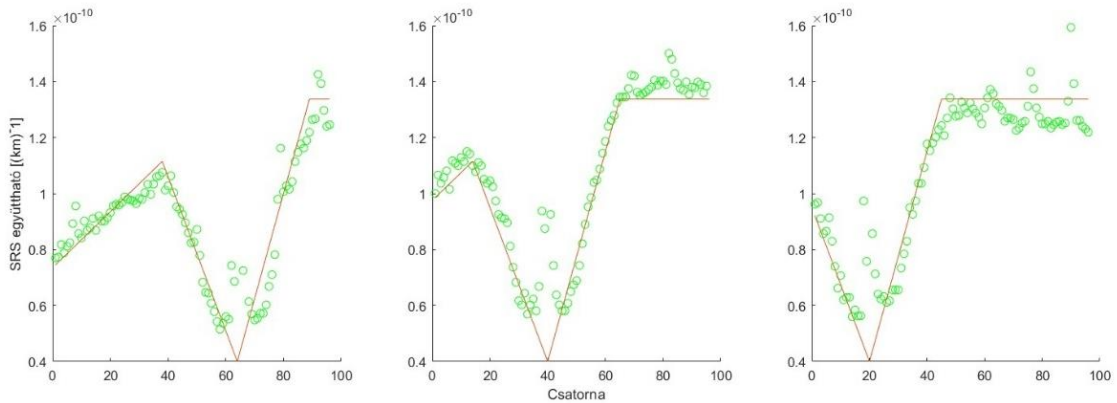


5.3. ábra – SRS együttható a kvantum csatorna elhelyezkedésétől függve, a mért csatornák jelölve

Minimális SRS együttható valóban a vártak szerint abban az esetben lesz, ha a kvantum csatorna a legnagyobb csatornán, a 96.-on helyezkedik el. Az ábrán kijelöltem a mért elméleti kvantum csatorna elrendezést, hogy össze tudjam hasonlítani a mért összefonyszámot a modellemből számolt SRS együtthatóval, mivel a fotonszám és az SRS együttható egymással egyenesen arányos.

A mérések alapján a 20. és a 40. csatornán mérték közt nincs jelentős különbség (20.: 341.7 Millió/sec, 40.: 342.36 Millió/sec), az ábra alapján sincs nagy különbség a kettő között, azonban eszerint a 40. csatornára alacsonyabb az SRS együttható, és ez nem látszik a mért eredményekből. Ez az eltérés származhat mérési pontatlanságból. A mérésekből a 64 csatornán mérve már nagyobb különbség figyelhető meg (64.: 283.25 Millió/sec) a másik két csatornához hasonlítva, ami az 5.3. ábra is látható.

Majd ábrázoltam, hogy a mért fotonszámokból átszámított SRS együtthatókra hogyan illeszkedik a módosított modell görbéje, a meghatározott változókkal.

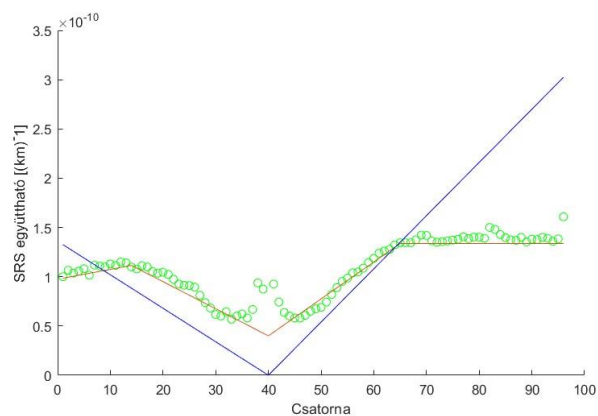


**5.4. ábra – A fotonzámból SRS együtthatóvá átszámított mért értékek (zöld), és a módosított modell szerinti görbe (piros)**

Látható, hogy a mért csatornához közvetlen közeli csatornákon (ezeken az áthallás miatt), valamint pár kiugró értéken kívül a kiegészített egyenlet mindhárom mérést pontosan leírja.

## 5.4 Összehasonlítás a V alakú modellel

A következő ábrából egyértelműen kitűnik, hogy a kiegészített modell sokkal pontosabban követi a mérési eredményeket, mint a V alakú modell, ami főleg a magasabb csatornákon mutat pontatlanságot.



**5.5. ábra – V alakú modell (kék), kiegészített modell (piros), és mérési pontok (zöld) összehasonlító ábrája**

Ezután egy táblázatban összegeztem a különböző esetek (mért, V alak és kiegészített modell)  $\sum \beta(i_q)$  értékeit a három kiválasztott csatorna esetében. A

táblázatból világosan látszik, hogy a kiegészített modell által számolt értékek közelebb vannak a mért értékekhez.

	Mérből számolt	V alak	Módosított modell
$\sum \beta(i_q = 20)$	$1.02355 \cdot 10^{-8} \text{ km}^{-1}$	$1.127 \cdot 10^{-8} \text{ km}^{-1}$	$1.0143 \cdot 10^{-8} \text{ km}^{-1}$
$\sum \beta(i_q = 40)$	$1.023553 \cdot 10^{-8} \text{ km}^{-1}$	$1.6446 \cdot 10^{-8} \text{ km}^{-1}$	$9.54925 \cdot 10^{-9} \text{ km}^{-1}$
$\sum \beta(i_q = 64)$	$8.38523 \cdot 10^{-9} \text{ km}^{-1}$	$9.7056 \cdot 10^{-9} \text{ km}^{-1}$	$8.40325 \cdot 10^{-9} \text{ km}^{-1}$

7. táblázat – Összehasonlító táblázat

A 2.4 pont alatt V alakkal végzett ábrázolásokból így a kvantum csatorna elhelyezkedés szerinti ábra változik a módosított modellel végzettre. Azonban a távolság szerint ábrázoltaknál az SRS együttható egy konstans szorzó, így ez nem befolyásolja a görbe alakját.

## 5.5 Konklúzió

Az eddig tárgyaltakból egyértelműen következik, hogy a módosított modell pontosabb leírást nyújt az SRS eloszlásáról, mint a korábban alkalmazott V alakú modell. Nem csak a saját mérésekre alapozva, de a feldolgozott szakirodalom által bemutatott mérési eredmények is megerősítik ezt a módosított eloszlás képletet, megteremtve az alapokat a kiegészített modell bevezetéséhez.

A kiegészített formulákon alapuló számítások és a modellezés egyaránt lehetővé tette az új, optimalizált csatornák elrendezésének meghatározását, mely már sokkal jobban igazodott a mért adatokhoz és a belőlük levont következtetésekhez. Emellett a képletekből származó görbék és a tényleges mérési eredmények között végzett összehasonlítás is megerősítette az új modell pontosságát.

Bár ezek a változók kifejezetten a konkrét mérési elrendezéshez lettek illesztve, a z változó az egyedüli, mely különösen érzékeny a rendszer zajaira és csillapítására, és így változna az adott mérési elrendezés szerint. Azonban paraméteresen kifejezve a képletek általánosan alkalmazhatók bármely más rendszerhez is. A fenti eredmények alapján sikeresnek tekinthetjük a méréseket és a módosított modell kidolgozását.



Valamint megvizsgáltam, hogy a mért spontán Raman szórás zajának a hatását a kvantum kulcsszétosztást. A zajszint és a kulcsrata összefüggésének témájában limitált számú szakirodalom áll rendelkezésre, azonban a [22] forrásban lévő CV-QKD rendszer alapján bemutatták, hogy  $-70$  dBm/0.1 nm zajszintnél kezd el csökkenni a kulcsrata, és  $-60$  dBm/0.1 nm felett már lehetetlenné válik a kulcsgenerálás. Mivel a spontán Raman szórás kivételével a többi felmerülő zaj és zavaró jelenség csökkenthető, ezért fontos meghatározni, hogy az SRS önmagában meggátolja-e a QKD működését, azaz, hogy az említett zajszint felett van-e.

A 96 csatornás rendszeren mért összefotonszámból a 2.4.3 pont alapján teljesítményt számoltam. A mérésnél a szűrőt  $0.5$  nm sávszélességre állítva használtam, tehát a teljesítményt 5-tel leosztottam a decibelbe való átváltás előtt, hogy dBm/0.1 nm értéket kapjak. A 20. és 40. csatornán  $-80.3$  dBm/0.1 nm, és a 64. csatornán  $-81.16$  dBm/0.1 nm a zajszint, ami a megadott korlát alatt van, tehát a CV-QKD esetében a kulcsgenerálást nem gátolja meg a Raman szórás.

## 6 Kiegészítő mérés

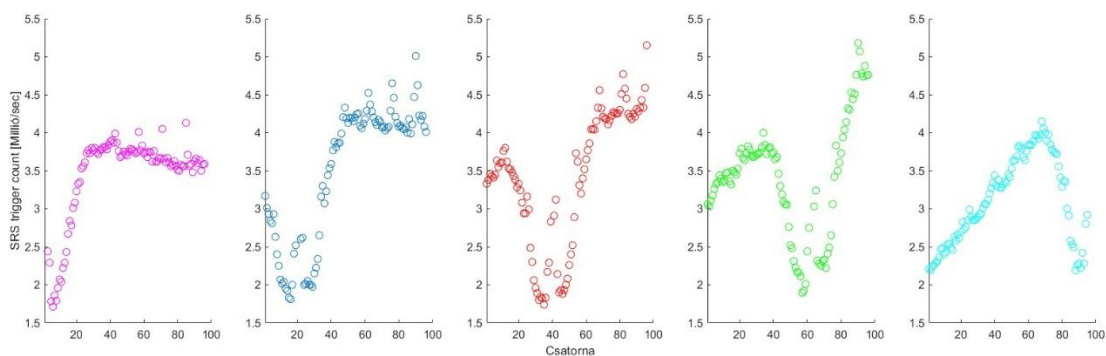
Az 5.3. ábra alapján az volt a konklúzió, hogy várhatóan a 96. csatornánál lesz a minimális az SRS hatása. Ennek a következtetésnek leellenőrzésére elvégeztem újra a 4. pontban leírt mérést, a két szélső csatorna, 1. és 96., mérésével kiegészítve.

A korábbi méréshez hasonlóan ismét 20 km-es szálát használtam. A lézer teljesítményét 7 dBm-re állítottam, 15 dB-es csillapítóval a kimenetén. Az optikai szálra jutó teljesítményt -9.03 dBm-nek mértem, így pontos eredményt kaptam a csillapító pontos értékéről, valamint a cirkulátor csillapításáról. A szűrőt 5 csatorna hullámhosszra állítva végeztem el a mérést: 1., 20., 40., 62. és 96. csatornán, és a sáv szélességet 1 nm-re állítottam be.

	1. csatorna	20. csatorna	40. csatorna	62. csatorna	96. csatorna
<b>Összes fotonszám [Millió/sec]</b>	323.62	328.92	324.1	320.36	295.825

8. táblázat – Mért fotonszámok összegezve az 5 mért csatornára

A táblázatban a szűrőn beállított hullámhosszra szóródott fotonokat összegeztem. Az elvárt tendencia körülbelül megfigyelhető, miszerint a csatorna növekedésével a spontán Raman szórás hatása csökken. Az első csatorna összefoton száma tér el egyedül kis mértékben az elvárttól, azonban azt igazolják a mérési eredmények, hogy a 96. csatornánál a legkisebb az SRS okozta szórt fotonok száma.

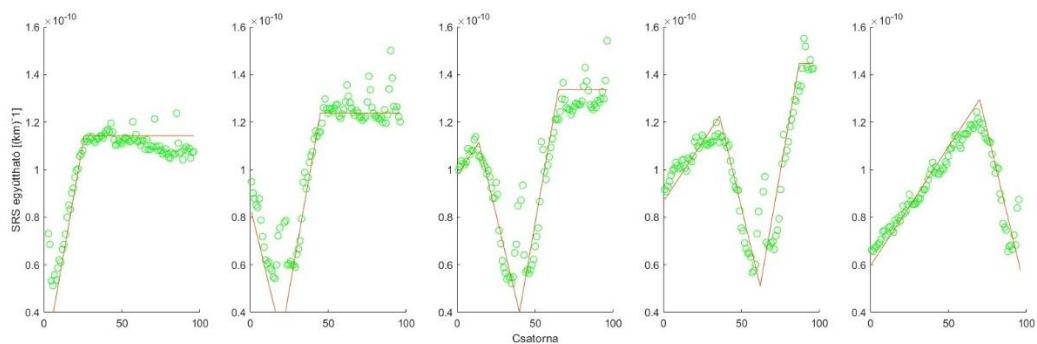


6.1. ábra – Sorrendben: 1. csatorna (rózsaszín), 20. csatorna (sötét kék), 40. csatorna (piros), 62. csatorna (zöld), 96. csatorna (világos kék)

Fenti mérési eredményekben látható, hogy a módosított modellben szereplő  $z$  változó, azaz a függőleges eltolás nő az elméleti kvantum csatorna növekedésével. A képleteket emiatt érdemes továbbfejleszteni a  $z$  változónak frekvenciafüggésének megvizsgálásával. A  $z$  új felírására az alábbi  $i_q$  elhelyezkedése függvényében való változást határoztam meg:

$$z = 3 \cdot 10^{-11} + (i_q \cdot 0.025 \cdot 10^{-11}) \text{ km}^{-1} \quad (22)$$

Majd az így kapott modellt összevettem a mérési eredményeimmel. A lenti ábrából látható, hogy a 22-es képlet megfelelően leírja a kvantum csatorna elhelyezkedése alapján változó függőleges eltolást.



**6.2. ábra – Az SRS együtthatóvá átszámolt mért értékek (zöld), és a pontosított  $z$  változóval korrigált modell szerinti görbe (piros)**

A  $z$  kiegészített meghatározása pontosította az SRS hullámhossztartománybeli eloszlásának leírását a kvantum csatorna elhelyezkedésének függvényében, és így precízebb képet adott a nemlineáris jelenség kvantum csatornára való hatásáról.

## 7 Összefoglalás

Szakedolgozat munkám során alapos és átfogó áttekintést készítettem a Spontán Raman szórás (SRS) jelenségéről a C-sávban egy DWDM rendszerben, különös tekintettel annak hatásaira a kvantum csatornára. A rendelkezésre álló szakirodalmak, és az általuk bemutatott mérési eredmények elemzése lehetővé tette számomra, hogy megalapozott következtetéseket vonjak le, melyek segítettek az SRS modellezésében.

A forrásokban említett V alakot követő SRS eloszlás alapján alkottam saját modellt. Ennek segítségével meghatároztam az SRS minimalizálására megfelelő csatornaelrendezést, valamint bemutattam, hogy az SRS hatása hogyan változik a csatornaelrendezéstől és távolságtól függve. Ezekből konklúziót vontam, miszerint az optimális csatornaelrendezés az, ha a kvantum csatorna a 62. csatorna, valamint azt, hogy az azonos irányú terjedésnél lesz kisebb az SRS hatása.

Majd saját méréseket végeztem a fentiek bizonyítására, ami során megvizsgáltam, hogy a távolság, teljesítmény, valamint a csatorna elrendezés hogyan befolyásolja a szórt fotonok számát. A távolság és teljesítmény függése megegyezett a várttal, azonban a csatornák vizsgálatával arra a konklúzióra jutottam, hogy a V alak nem nyújt pontos leírást az SRS eloszlására, így szükséges a V alak kiegészítése.

Egy módosított modellt elkészítettem, és az SRS együtthatót leíró képleteket kiegészítettem. A módosított modell helytállóságát források méréseivel is igazoltam. Majd a kiegészített modell felhasználásával újabb MATLAB szimulációkat végeztem, amiből látható volt, hogy a minimális csatornaelrendezés a V alakú modelltől kapott értékkel nem egyezik, hanem akkor minimális, ha a kvantum csatorna a legmagasabb frekvenciájú csatorna, majd ezt további mérésekkel igazoltam. Összehasonlító ábráimon egyértelműen látszik, hogy a kiegészített modellem pontosabb leírást ad az SRS eloszlásáról, mint a V alakú modell. A modell további finomításával még lehet pontosítani az eredményeket, azonban ez az optimális csatornaelrendezés meghatározásában nem hoz drasztikus változást.

Összességében úgy vélem, hogy eredményeim, a legjelentősebb nemlineáris zaj minimalizálása, hasznos hozzájárulást jelenthetnek a kvantum csatorna klasszikus csatornákkal való integrálásában levő lehetőségeinek feltárásában.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni konzulensemnek, Gerhátné Dr. Udvary Eszternek az értékes útmutatását és támogatását. Segítsége és konstruktív visszajelzései kulcsfontosságúak voltak a szakdolgozatom elkészítése során.

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL-2022-00004 számú projekt és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA Grant K 142845 projekt finanszírozásában valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Maanav Seth, Amit Yadav. Fundamentals of Quantum Key Distribution — BB84, B92 & E91 protocols. Medium: (Letöltve: 2023.08.04) <https://medium.com/@qcgiitr/fundamentals-of-quantum-key-distribution-bb84-6b92-e91-protocols-e1373b683ead>
- [2] Jonathan Hui, (2018 november 20) QC – What are Qubits in Quantum computing? Medium (Letöltve: 2023.08.08) <https://jonathan-hui.medium.com/qc-what-are-qubits-in-quantum-computing-cdb3cb566595>
- [3] Shinya Murai - The Principles of Quantum Key Distribution Technology and the BB84 Protocol (Letöltve: 2023.08.12) <https://www.global.toshiba/ww/company/digitalsolution/articles/tsoul/38/004.html>
- [4] Gui, A. (2015. május 25.). Capacity Expansion and Flexibility—DWDM Network. Fiber Optic Cabling Solutions: (Letöltve: 2023.08.10) <https://www.cables-solutions.com/capacity-expansion-and-flexibility-dwdm-network.html>
- [5] International Telecommunication Union. (2020). ITU-T G.694.1: Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical systems: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Telecommunication Standardization Sector of ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I>
- [6] Bahrami, A., Lord, A., & Spiller, T.P. (2020). Quantum key distribution integration with optical dense wavelength division multiplexing: a review. IET Quantum Communication. doi: 10.1049/iet-qtc.2019.0005
- [7] Sóki András – Kvantum csatorna integrálása meglévő optikai hálózatokba, TDK dolgozat (2022)
- [8] Raman Spectroscopy: (Letöltve: 2023.08.31) <https://integratedoptics.com/Raman-Spectroscopy>
- [9] R. Lin and J. Chen, "Modeling and Minimizing Spontaneous Raman Scattering for QKD Secured DWDM Networks," in IEEE Communications Letters, vol. 25, no. 12, pp. 3918-3921, Dec. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3116755.
- [10] T. Ferreira da Silva, G. B. Xavier, G. P. Temporão and J. P. von der Weid, "Impact of Raman Scattered Noise from Multiple Telecom Channels on Fiber-Optic Quantum Key Distribution Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 13, pp. 2332-2339, 1 July, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2322108.
- [11] J. Lai, X. Lin, Y. Qian, L. Liu, W. Zhao, and H. Zhang, "Deployment-oriented integration of DV-QKD and 100G optical transmission system," in Asia

Communications and Photonics Conference (ACPC) 2019, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2019), paper T2H.1. ISBN: 978-1-943580-70-5

- [12] Larry Legg (October 14, 2020): VIDEO: What is DWDM? (Letöltve: 2023.09.17) <https://www.championone.com/blog/what-is-dwdm>
- [13] Qi, B., Zhu, W., Qian, L., & Lo, H.-K. (2010). Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network. *New Journal of Physics*, 12(10), 103042. doi:10.1088/1367-2630/12/10/103042
- [14] Geoff Bennett (2021) – All You Ever Wanted to Know About Optical Transmission Bands (Letöltve: 2023.09.16) <https://www.infinera.com/blog/all-you-ever-wanted-to-know-about-optical-transmission-bands/tag/optical/>
- [15] Wang, L.-J., “Long-distance copropagation of quantum key distribution and terabit classical optical data channels”, *Physical Review A*, vol. 95, no. 1, 2017. doi:10.1103/PhysRevA.95.012301.
- [16] Chapuran, T. E. et al. Optical networking for quantum key distribution and quantum communications. *New J. Phys.* 11, 105001 (2009). doi: 10.1088/1367-2630/11/10/105001
- [17] Asif Shaik, *Physics and Radio-Electronics – EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)* (Letöltve: 2023.08.27) <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/edfa-erbium-doped-fiber-amplifier/>
- [18] Agrawal, G.P.: *Fiber-Optic Communication Systems*, ISBN 9780470922828, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2012
- [19] JDS Uniphase Corporation (2009), 5205/5206 Integrable Tunable Laser Assembly (ITLA)
- [20] ID Quantique SA (2023), ID281 Superconducting Nanowire Series
- [21] EXFO Inc. (2023), XTM-50 Tunable Optical Filter with Adjustable Bandwidth
- [22] Eriksson, T.A., Hirano, T., Puttnam, B.J. et al. Wavelength division multiplexing of continuous variable quantum key distribution and 18.3 Tbit/s data channels. *Commun Phys* 2, 9 (2019). <https://doi.org/10.1038/s42005-018-0105-5>