

DALGABOYU BÖLMELİ ÇOĞULLAMALI (WDM) SİSTEMLERDE UYARILMIŞ RAMAN DİYAFONİSİNİN İLETİŞİM PERFORMANSINA ETKİSİ

Bildiri Konusu : Haberleşme Tekniği ve Sistemleri

Veysel KORKMAZ

Pamukkale Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
DENİZLİ
vkorkmaz@pamukkale.edu.tr

Ahmet ALTUNCU

Dumlupınar Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
KÜTAHYA
altuncu@dumlupinar.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (WDM) iletişim sistemlerinde, uyarılmış Raman saçılmasının (SRS) neden olduğu diyafoni'nin (Crosstalk) iletişim performansına etkisi incelenmiştir. N kanallı bir WDM sistemde uyarılmış Raman saçılması nedeniyle düşük dalgaboylu kanallardan yüksek dalgaboylu kanallara doğru oluşan diyafoni miktarı ve yüksek dalgaboylu kanallardaki sinyal güçlerinin değişimi, mesafe ve diğer sistem parametrelerinin fonksiyonu olarak simülasyonla elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (WDM), Uyarılmış Raman Saçılması (SRS), Diyafoni (Krosstalk)

1. GİRİŞ :

İnternet ve multimedya teknolojilerinin yakın zamanda yaygınlaşması, geniş band fiber optik iletişim sistemlerinin küresel kapsamda kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Yüksek kapasiteli fiber optik sistemlerin tasarımında yakın zamanda daha çok tercih edilen yöntem ise, modülasyon ve çoğullama gibi işlemler için yüksek hızda elektronik devreler gerektirmeyen Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing-WDM) tekniği olmuştur. Uzak mesafe fiber optik linklerdeki ve optik ağlardaki sinyal zayıflamalarını kompanze etmek amacıyla erbiyum katkılı fiber optik amplifikatörlerin (EDFA) kullanılmaya başlanması ise, çoklu optik kanalların EDFA amplifikasyon bandına sık olarak yerleştirildiği yoğun WDM (DWDM) sistemleri gündeme getirmiştir. Diğer taraftan fiberde yüksek güç taşınırken ortaya çıkan Uyarılmış Raman Saçılması (SRS-Stimulated Raman Scattering), Uyarılmış Brillouin Saçılması (Stimulated Brillouin Scattering-SBS), Çapraz Faz Modülasyonu (Cross Phase Modulation-XPM) ve Dört Dalga Karışımı (Four Wave Mixing-FWM) gibi nonlineer etkilerin, iletişim performansını sınırladığı bilinmektedir [1-3]. WDM sistemlerde ise nonlineer etkilerin kanal sayısı ile arttığı görülmüştür. Yakın zamanda yapılan çalışmalar, iyi bir tasarımla nonlineer etkilerin büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Sonuçta, toplam kanal

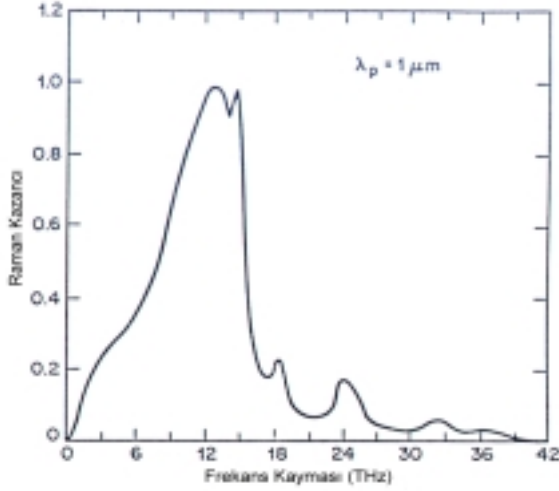
gücünün oldukça fazla olduğu çok kanallı WDM sistemlerde performansın, başlıca SRS tarafından sınırlandırıldığı anlaşılmıştır [4,5].

SRS 'in diyafoni etkisi, fiberde taşınan optik güç yoğunluğuna kritik şekilde bağlıdır. Bu nedenle, SRS kaynaklı diyafoni, prensipte Raman saçılması eşik güç seviyesinin üzerindeki optik güçler için dikkate değerdir. SRS'nin WDM haberleşme sistemlerine etkisi önceki çalışmalarda incelenmiştir [4-7]. Bu çalışmalarda, kanallar arasındaki SRS kaynaklı diyafoni, zayıf pompalama (undepleted pump) yaklaşımını kullanarak nümerik veya analitik olarak ele alınmıştır. Elde edilen analitik sonuçlar, yalnızca zayıf SRS güç değişimleri için geçerlidir ve tüm kanalların eşzamanlı olarak eşit güç taşıdığını varsaymaktadır.

2. TEORİ :

Bu çalışmada, bir WDM fiber optik haberleşme sisteminde SRS kaynaklı diyafoninin kanal sayısı, kanal aralığı ve fiber uzunluğu ile değişimi analitik yolla incelenecektir. Bu analizde, Şekil 1 de görülen Silika fiberin Raman kazanç spektrumu üçgen yaklaşımı ile birlikte kullanılmıştır [4]. Aşağıda verilen model, herhangi bir N kanallı sistemde rastgele kanal güçleri

için kullanılabilir. Bu model sayesinde çok kanallı fiber optik sistemlerde, Raman penaltısının analizi de yapılabilir [4].



Şekil 1. Silika için Raman kazanç spektrumu (10^{-13} m/W) [4]

Bir tek modlu optik fiberde farklı dalgaboylarına konuşlandırılmış N sayıda kanalın birlikte iletiildiği bir sistemi ele alalım. Kanalların Raman kazanç spektrumunun lineer kısmının içinde kaldığı ve spektral ekseninde eşit Δf aralıklarla dizildiği varsayılmaktadır. 1. kanal en düşük ve N. kanal yayılan en yüksek dalgaboylu kanal olarak kabul edilmiştir. SRS yoluyla daha düşük dalgaboylu kanaldan (1. kanal), daha yüksek dalgaboylu kanala (N. kanal) doğru güç akışı olacaktır. Bir kanaldaki maksimum güç kaybı, SRS'in maksimum olduğu her bir kanalda binary 1 iletilmesi varsayıldığında meydana gelir. Şekil 1'den Raman kazancının frekansla lineer olarak değiştiği ve 13.2 THz'lik Stokes kaymasında maksimum olduğu görülmektedir. N kanallı bir WDM sistemde, kanallar arası SRS güç transferinin uzaklıkla değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem takımı ile ifade edilebilir [7].

$$\frac{dP_n(z)}{dz} + \alpha P_n(z) + \left(\frac{g' \Delta f}{2A_{eff}} \right) P_n(z) \sum_{m=1}^N (m-n) P_m(z) = 0 \quad (1)$$

Burada ;

$P_n(z)$: z Propagasyon uzaklığının bir fonksiyonu olarak n. kanaldaki güç.

α : Fiber zayıflama katsayısı

$g' = \frac{dg}{df}$: Raman kazanç spektrumunun eğimi

Δf : Kanallar arası frekans aralığı

A_{eff} : Tek modlu fiberin efektif kesit alanı

Denklem (1)'de, iki ortogonal polarizasyonun ortalamasını almak için hesaplanan kazanç 2 ile bölünmüştür. Denklem (1)'de ayrıca, $w_n/w_m \approx 1$ kabul edilmekte ve farklı kanallar

arasındaki dispersiyon kaynaklı darbe gecikmeleri (walk off) dikkate alınmamaktadır. Bu sayede, WDM iletişim sisteminin en yüksek SRS diyafoni değeri (en kötü durum) elde edilmektedir. Denklem (1)'in genel çözümü [4].

$$P_n(z) = P_{n0} J_0 e^{-\alpha z} \cdot e^{[(G J_0 (n-1) L_{eff})]} \left[\sum_{m=1}^N P_{m0} \cdot e^{(G J_0 (m-1) L_{eff})} \right]^{-1} \quad (2)$$

şeklinde verilebilir. Burada ;

$$G = \frac{g' \Delta f}{2A}, \quad J_0 = \sum_{m=1}^N P_{m0}, \quad L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \quad (3)$$

ve

P_{n0} : n. kanalın giriş gücü

L_{eff} : Efektif propagasyon mesafesi

J_0 : Sistemin toplam giriş gücü

Maximum SRS diyafoni oranı aşağıdaki gibi tanımlanabilir [4] :

$$XT = \left[P_0 e^{-\alpha z} - P_1(z) \right] / \left[P_0 e^{-\alpha z} \right] \quad (4)$$

Bu bağıntı, en düşük kanalda SRS yoluyla gerçekleşen oransal güç kaybını verir. Diyafoni oranı, denklem (2)'de tüm kanalların giriş güçleri eşit ($P_{n0} = P_0$) kabul edildiğinde, aşağıdaki gibi elde edilebilir [4].

$$XT = 1 - N e^{\left(\frac{-GNJ_0 L_{eff} (N-1)}{2} \right)} \left[\text{Sinh} \left(\frac{NGJ_0 L_{eff}}{2} \right) / \text{Sinh} \left(\frac{N^2 GJ_0 L_{eff}}{2} \right) \right] \quad (5)$$

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI :

SRS Kaynaklı diyafoninin N kanallı bir WDM sisteme etkisi (1-5) bağıntıları kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla alınan $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ de çalışan tipik bir tek modlu optik fiber (S-SMF) için, zayıflama katsayısı $\alpha = 0.2$ dB/km (0.046 km^{-1}) ve Raman kazanç eğimi de yaklaşık olarak $g' = 4.9 \cdot 10^{-18}$ m/(WGHz) olarak kabul edilmiştir. Fiberin efektif kesit alanı $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$ ve kanallar arası frekans boşluğu $\Delta f = 100$ GHz varsayılmaktadır.

Şekil 2, herbirine 2 mW giriş gücü uygulanan N = 100 kanallı bir WDM sistemde ($\Delta \lambda \approx 80$ nm), 10, 20 ve 80 km fiber uzunluklarında oluşan diyafoni oranını kanal numarasının

fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekilden, daha yüksek dalgaboylu kanallarda oluşan diyafoninin, daha yüksek Raman kazancı nedeniyle daha yüksek olduğu ve fiber uzunluğuyla arttığı anlaşılmaktadır. 20 km uzunlukta 100. kanala SRS diyafoni yoluyla aktarılan optik güç kanal gücünün %50 sine ulaşmaktadır. Şekil 3, $N = 25, 50$ ve 100 kanallı WDM sistemlerde 2 ve 4 mW'lık giriş güçleri için oluşan diyafoniyi iletim mesafesinin bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Buradan da kanal sayısı ve mesafenin yanında, giriş güçlerindeki artışın da diyafoni oranını arttırdığı görülebilir. Tipik olarak 100 GHz aralıklı 50 kanallı bir WDM sistemde ($\Delta\lambda \approx 40$ nm), SRS kaynaklı diyafoniyi %20'lerin altında tutmak için kanal giriş güçlerinin 2 mW'ın altında tutulması gerektiği görülür.

Şekil 4, herbir kanala 2mW giriş gücü uygulanmış 100 kanallı bir WDM sistemde 1, 50 ve 100. kanal için kanal gücünün mesafe ile değişimini göstermektedir. Daha uzun dalgaboylu kanallara SRS kaynaklı diyafoni yoluyla aktarılan güç nedeniyle 50. ve 100. kanaldaki sinyal güçleri 1. kanala göre farklı oranlarda zayıflamaktadır. Şekil 5, 2mW giriş güçlü, 10 km uzunlukta 100 kanallı bir WDM sistemin çıkışında herbir kanalın aldığı güç değerini göstermektedir. Kanal güçleri yaklaşık 0.8 mW'tan 1.8 mW'a kadar değişmektedir. Şekil 6, 2 mW tepe gücünde ve 10 ps genişlikte bir Gausiyen darbenin 100 km uzunlukta tek kanallı kayıpsız fiberde iletimini göstermektedir.

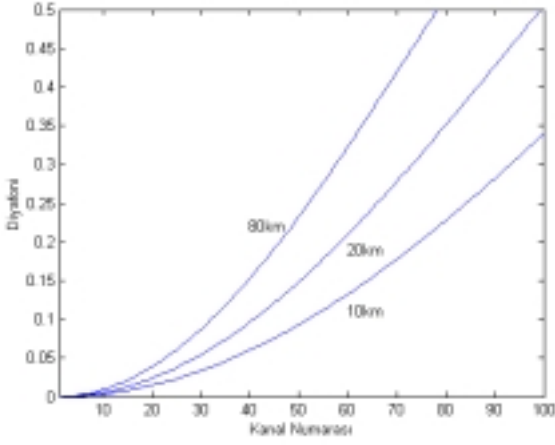
Şekil 7-9 ise 10 ps genişlikte ve 2 mW tepe güçlü Gausiyen darbenin 100 kanallı bir WDM sisteminin sırasıyla 1. 50. ve 100. kanalında SRS kaynaklı diyafoni etkisi altında iletimini 3-D ortamda göstermektedir. İletim fiberi olarak, 100 km uzunlukta ve 0.2 dB/km kayıp katsayılı S-SMF kullanılmıştır. Bu şekillerden, SRS kaynaklı diyafoni nedeniyle düşük dalgaboylu kanalın (1.kanal) büyük dalgaboylu kanallara (50 ve 100. kanal) göre daha çok güç kaybına maruz kaldığı görülmektedir.

4. SONUÇ :

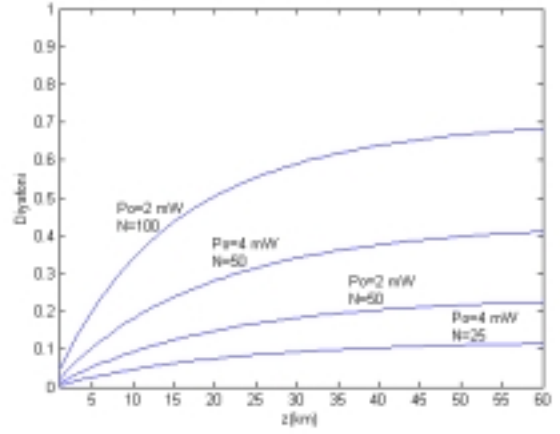
Bu çalışmada, N kanallı bir WDM sistemde uyarılmış Raman saçılması (SRS) nedeniyle düşük dalgaboylu kanallardan yüksek dalgaboylu kanallara doğru oluşan diyafoni miktarı ve yüksek dalgaboylu kanallardaki sinyal güçlerinin değişimi, mesafe ve diğer sistem parametrelerinin fonksiyonu olarak simülasyonla elde edilerek incelenmiştir. Sonuç olarak, SRS kaynaklı diyafoni WDM iletim sistemini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etki, düşük dalgaboylu kanallardan yüksek dalgaboylu kanallara doğru SRS diyafoni yoluyla güç aktarımı şeklinde ortaya çıkmaktadır. SRS Diyafoni oranı veya aktarılan güç miktarı, Raman kazanç spektrumunu takip etmekte ve ayrıca kanal sayısı, kanal aralığı, iletim mesafesi ve kanal giriş gücü ile orantılı olarak artmaktadır. Tipik iletim mesafelerinde diyafoni miktarını azaltmak için, giriş sinyal güçlerinin 2 mW ve aşağısında tutulması, kanal sayısının 100 GHz'lik kanal aralığı için 50 veya aşağısı olarak sınırlanması gerekmektedir. Şayet kanal aralığı 50 GHz veya 25 GHz'e düşürülürse, 100 kanallı bir WDM sinyalin, Raman kazancının özellikle düşük değerler aldığı spektrumun ilk yarısında (1.kanaldan itibaren 0-50 nm aralığı) tutulması sağlanabilir ve böylece SRS etkisi daha düşük değerde kalır.

KAYNAKLAR

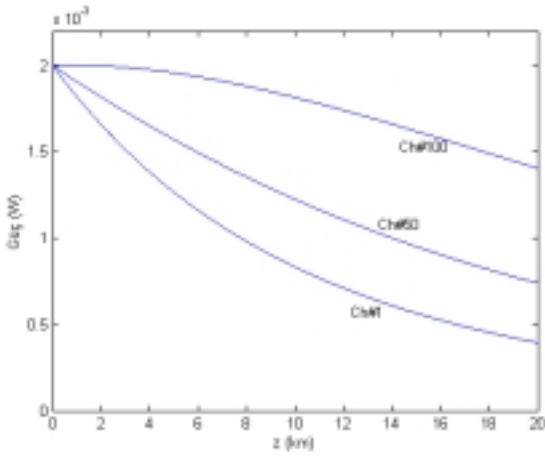
- [1] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 3rd ed. San Diego, CA, Academic Press, 2001.
- [2] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, pp.1548–1557, 1990.
- [3] A. R. Chraplyvy and R. W. Tkach, "What is the actual capacity of singlemode fibers in amplified lightwave systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, pp. 666–668, 1993.
- [4] A. R. Chraplyvy, "Optical power limits in multichannel wavelength division-multiplexed systems due to stimulated Raman scattering," *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 58–59, 1984.
- [5] S.Norimatsu, T.Yamamoto, "Waveform distortion to stimulated Raman scattering in wide-band WDM transmission systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol.19, pp.159-171, Feb. 2001
- [6] S. T. Tariq and J. C. Palais, "A computer model of nondispersion limited stimulated Raman scattering in optical fiber multiple-channel communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 11, pp. 1914–1924, 1993.
- [7] D. N. Christodoulides and R. B. Jander, "Evolution of stimulated Raman crosstalk in wavelength division multiplexed systems," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp. 1722-1724, Dec. 1996
- [8] D. Cotter and A. M. Hill, "Stimulated Raman crosstalk in optical transmission: Effects of group velocity dispersion," *Electronics Letters*, vol. 20, pp. 185–187, 1984.



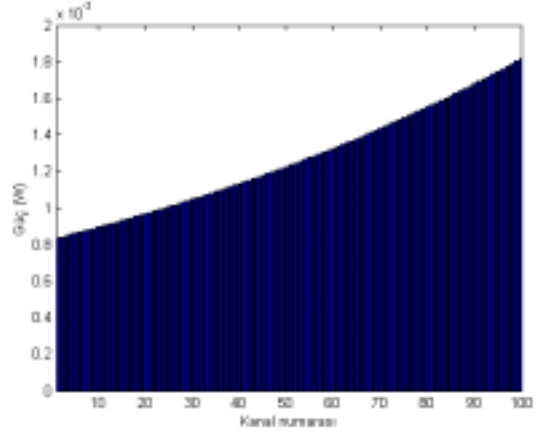
Şekil 2. 100 kanallı bir WDM sistemde diyafoni-kanal numarası değişimi.
 $P_0=2 \text{ mW}$, $\Delta f=100 \text{ GHz}$, $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$ $z=10,20,80 \text{ km}$



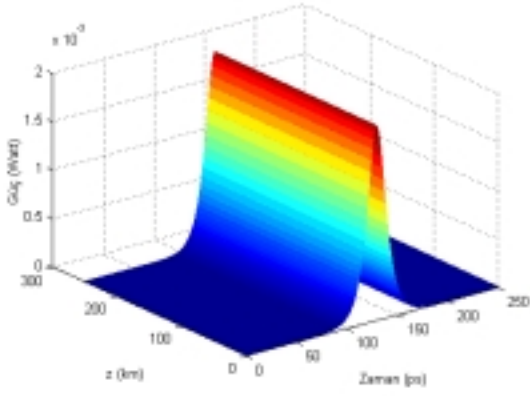
Şekil 3. 25, 50 ve 100 kanallı WDM sistemlerde 2 ve 4 mW'lık giriş güçleri için diyafoni-mesafe değişimi.
 $\Delta f=100 \text{ GHz}$ $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$, $z=60 \text{ km}$



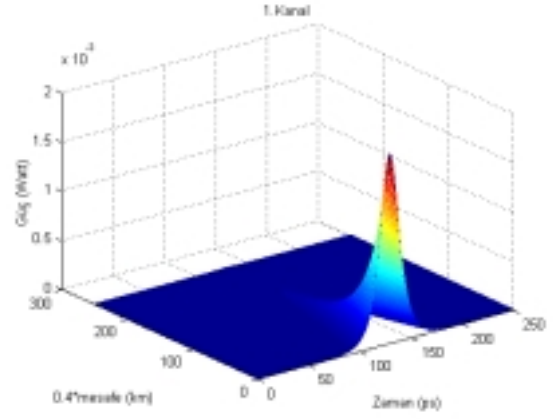
Şekil 4. 100 kanallı bir WDM sistemde 1, 50 ve 100. kanal için kanal gücü-mesafe değişimi.
 $P_0=2 \text{ mW}$, $\Delta f=100 \text{ GHz}$, $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$



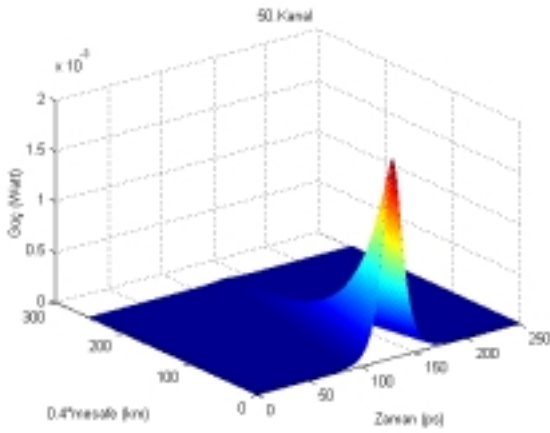
Şekil 5. 100 kanallı bir WDM sistemin çıkışındaki kanal güçleri.
 $P_0=2 \text{ mW}$, $\Delta f=100 \text{ GHz}$ $\alpha=0.2 \text{ dB/km}$, $z=10 \text{ km}$



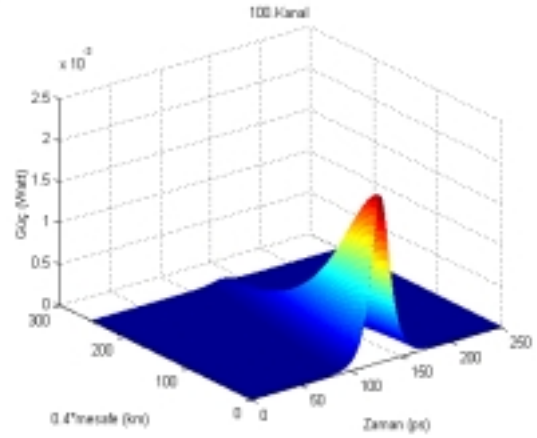
Şekil 6. Gausiyen darbenin tek kanallı kayıpsız fiberde iletimi.
 $P_0=2$ mW, $\alpha=0$ dB/km, $z=100$ km



Şekil 7. Gausiyen darbenin 100 kanallı bir WDM sisteminin 1. kanalında ve kayıplı fiberde iletimi.
 $P_0=2$ mW $\Delta f=100$ GHz, $\alpha=0.2$ dB/km, $z=100$ km



Şekil 8. Gausiyen darbenin 100 kanallı bir WDM sisteminin 50. kanalında ve kayıplı fiberde iletimi.
 $P_0=2$ mW, $\Delta f=100$ GHz, $\alpha=0.2$ dB/km, $z=100$ km



Şekil 9. Gausiyen darbenin 100 kanallı bir WDM sisteminin 100. kanalında ve kayıplı fiberde iletimi.
 $P_0=2$ mW, $\Delta f=100$ GHz, $\alpha=0.2$ dB/km, $z=100$ km