

OPTİK GERİ BESLEMELİ DİYOT LAZERLERİN KÜÇÜK YERDEĞİŞTİRME ÖLÇÜMLERİNDE UYGULANMASI

*Ramiz GAMİDOV, Enver SADIKHOV, Mustafa ÇETİNTAŞ
TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)*

ÖZET

Hareket eden yüzeyin temassız olarak yerdeğiştirmesinin ölçümü, lazer frekansındaki değişimin ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Diyot lazerinin demeti hareket halindeki yüzeye odaklanarak, bu yüzeyden optiksel geri besleme sağlanmıştır. Yüzeyin hareketi lazer rezonatörünün uzunluğunu ve dolayısıyla lazerin frekansını değiştirmektedir. Lazerin frekansındaki değişim Fabry-Perot enterferometresi ve side-band spektroskopisi tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Geliştirilen ölçüm yöntemi kullanılarak matkap, kompresör, güç kaynağı gibi çeşitli nesnelere yerdeğiştirmesi yüksek doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ölçüm sistemi standart referans ivme ölçerlerin düşük titreşim seviyelerindeki kalibrasyonunda kullanılmıştır.

1. GİRİŞ

Temassız titreşim ölçümlerinin önemi her geçen gün artmaktadır. Temassız titreşim ölçümlerine bu yoğun ilginin nedeni, ölçümlerin endüstride hareketli parçaların tahribatsız kontrol ve analizi amacıyla kullanılmasıdır. Titreşim metrolojisinde küçük yerdeğiştirmelerin temassız olarak ve yüksek doğrulukla ölçümü de yapılan araştırmaların gerekçelerinden birisi olarak gösterilebilir.

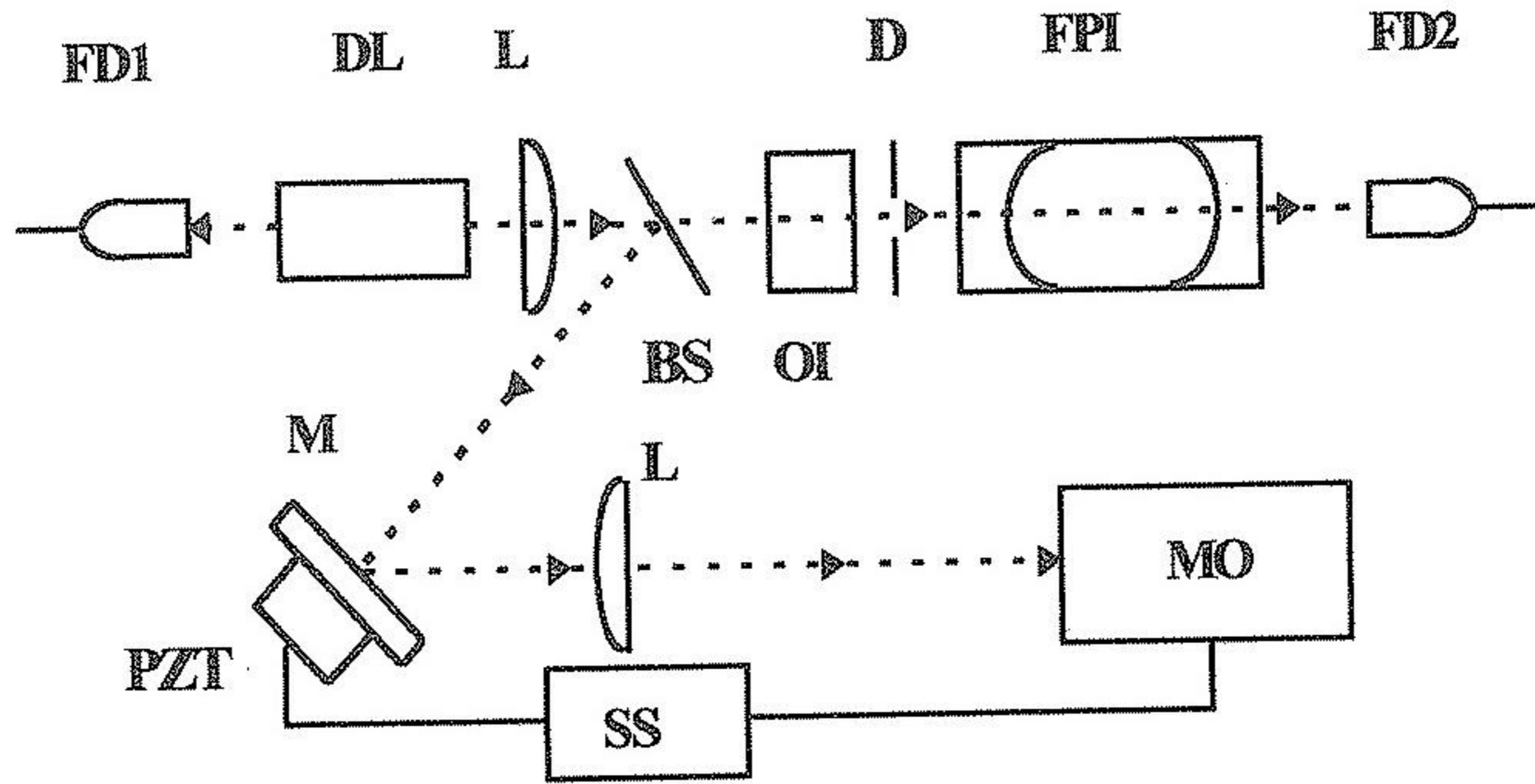
Günümüzde mekanik titreşimlerin ivme, hız ve yerdeğiştirme gibi parametrelerini temassız olarak ölçümlerini gerçekleştirmek için farklı yöntemler mevcuttur [1-3]. Bu yöntemler arasında optiksel ölçüm yöntemleri diğerlerine göre ulaşılabilirlik ve çözünürlük değerlerine göre çok daha avantajlıdır. Optiksel ölçüm yöntemleri de kendi aralarında üç farklı grupta toplanabilir: enterferometre esasındaki yöntemler, lazer ışığının çeşitli parametrelerinin modülasyonu esasındaki yöntemler ve lidar kullanan yöntemler. Yapılan araştırmalar sonucunda günümüzde birkaç ölçüm cihazı ticari olarak satışa sunulmuştur. Bu tür cihazlarda çoğunlukla He-Ne lazeri ve enterferometrik girişim saçakları sayma yöntemi kullanılmakta olup, cihazların çözünürlük değeri genellikle lazerin yarıdalga boyu $\lambda/2$ kadardır. Son yıllarda diyot lazerlerinin üretim teknolojisindeki hızlı gelişim, bu lazerlerin metrolojinin farklı dallarında ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılması için yeni ufuklar açmıştır [4]. Bu sebeple diyot lazerleri temassız titreşim ölçümlerinde de kullanılmaya konmuş olup, bu tür uygulamalarda He-Ne lazerleri ile rekabet edecek güçtedirler [5].

Diyot lazerinin optiksel geri beslemeye çok duyarlı olduğu [6] dikkate alınarak, temassız yerdeğiştirme ölçümü için yeni yöntem geliştirilmiştir [7]. Geliştirilmiş olan yöntemin çözünürlük değeri nm'nin çok daha altındadır. Bu yöntemde hareket eden bir yüzey diyot lazerin dış aynası olarak kullanılmakta ve dış kaviteli diyot lazeri (ECDL) sistemi oluşmaktadır. Böylece diyot lazer demetinin odaklanmış olan yüzeyi titreşiminden dolayı lazerin frekansını değiştirmektedir. Lazer frekansındaki değişim Fabry-Perot enterferometresi ve sind-band spektroskopisi tekniği kullanılarak belirlenir ve titreşen yüzeyin mutlak yerdeğiştirme değeri hesaplanır. Geliştirilen titreşim ölçme yöntemi Michelson enterferometre esnasındaki klasik ölçme yöntemlerine göre hareketli yüzeyin yüksek yansımaya katsayısı değeri talep etmediğinden özellikle endüstriyel uygulamalarda daha kullanışlıdır.

2. TEMASSIZ TİTREŞİM ÖLÇME DÜZENEGİ

Temassız titreşim ölçümlerini gerçekleştirmek için kullanılan ölçüm düzeneğinin blok-diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir. Diyot lazeri DL'nin ışığının bir kısmı demet bölücü BS yardımıyla piezoseramik PZT üzerinde monte edilmiş M aynası ve L merceği yardımıyla hareket eden MO nesnesi yüzeyine odaklanmaktadır. Titreşen yüzeyden yansıyan ışın, diyot lazerine geri gönderilerek rezonans dışı optik geri besleme oluşturmaktadır. Böylece hareketli nesnenin yüzeyi ECDL'nin dış aynası fonksiyonunu yapmaktadır. Gerçekleştirilen yerdeğiştirme ölçümlerinde tek modda çalışan ve 780 nm dalgaboyuna sahip SDL-5401-G diyot lazeri kullanılmıştır.

Bilindiği gibi dış kavitenin uzunluğu L ; bir başka deyişle DL ile MO arasındaki mesafe, ECDL'nin çıkış frekansı n 'yu belirler.



Şekil 1. Yerdeğiştirme ölçümü için deney düzeneğinin blok-diyagramı

ECDL'nin rezonatör uzunluğunun ΔL kadar değişimi, diyot lazerinin frekansında $\Delta \nu$ değişimine neden olacaktır. Lazer spektrumu Fabry-Perot enterferometresi ile incelenmekte olup, frekanstaki değişimler enterferometrenin rezonansları arasındaki aralık 600 MHz ve finess değerinin 30 olduğu dikkate alınarak belirlenmektedir. Ölçüm düzeneyinde kullanılan optik izolatörü, diyot lazerinin yüzeyine istenmeyen optiksel ışınların düşmesini önlemektedir. Böylece

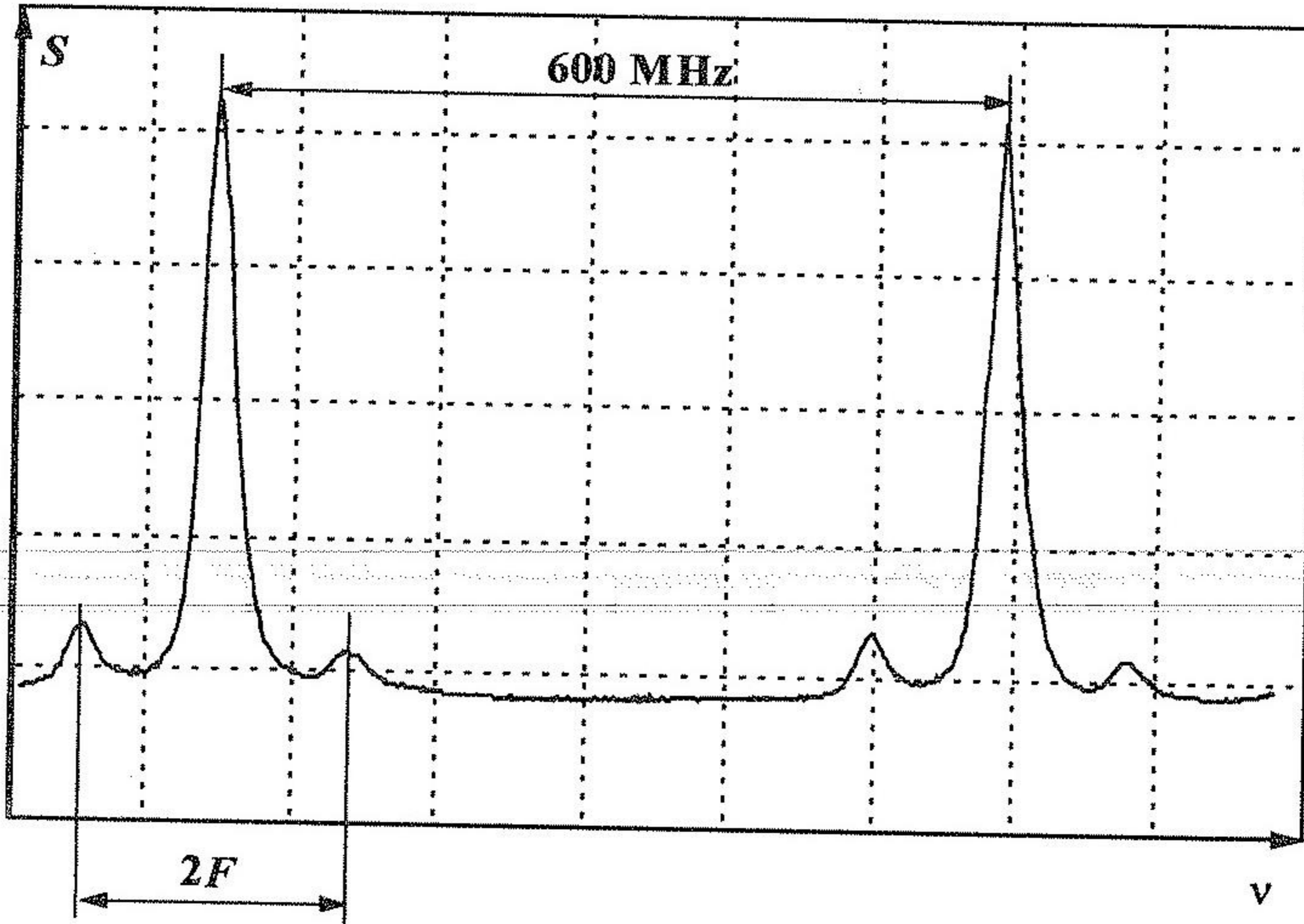
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

eşitliğini göz önüne alarak, hareketli yüzeyin mutlak yerdeğiştirme değeri ΔL basit bir şekilde hesaplanabilir. Yukarıdaki ifadede, L - ECDL'nin rezonatör uzunluğu, ν ise lazerin frekansıdır. Eşitlik (1)'den görüldüğü gibi titreşen yüzeyin mutlak yerdeğiştirme değerinin hesaplanması için $K=L/\nu$ katsayısının değeri yüksek doğrulukla belirlenmelidir. Bu katsayısı değerinin belirlenmesinde fazla zorluklara raslamamak için kalibre edilmiş piezoseramiğin parametrelerinden faydalanılmıştır. Ölçüm sırasında kullanılan ve üzerine ayna monte edilmiş PZT'nin (Dr.Lutz Pickekmann GmbH HPSt: 500/15-8/5 tip) kalibrasyonu, bir başka deyişle uygulanan gerilim değerine uzunlamanın belirlenmesi, frekansı Cs atomlarının D_2 enerji geçişine kilitlemiş olan diyot lazeri (dalga boyu 852,112 nm) ve klasik Michelson enterferometresini içeren düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Titreşen yüzeyin yerdeğiştirmesinden dolayı doğan lazer frekansındaki değişimi daha hassas bir frekans ölçeğinde incelemek amacıyla gerçekleştirilen ölçümlerde side-band spektroskopisi tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğin esasları kısaca bu şekilde açıklanabilir. Diyot lazerine, F -modulasyon frekansı olmak üzere

$$I(t) = I_0 + I_1 \sin(2\pi Ft) \quad (2)$$

şeklinde değişken akım uygulandığında lazer ışığının spektrumunda temel frekans n 'nün dışında iki $+F$ ve $-F$ aralıkta iki yan bileşen oluşmaktadır. Bu bileşenler, Fabry-Perot enterferometresi çıkışında Şeki2'de gösterildiği gibi algılanabilir. Böylece ölçümler sırasında modulasyon frekansının 20-300 MHz aralığında değiştiği dikkate alınrsa, $\Delta\nu$ belirlenmesinde ne kadar bir frekans ölçeğine sahip olduğumuz anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Lazer spektrumunda değişken akımdan dolayı oluşan yan bileşenler

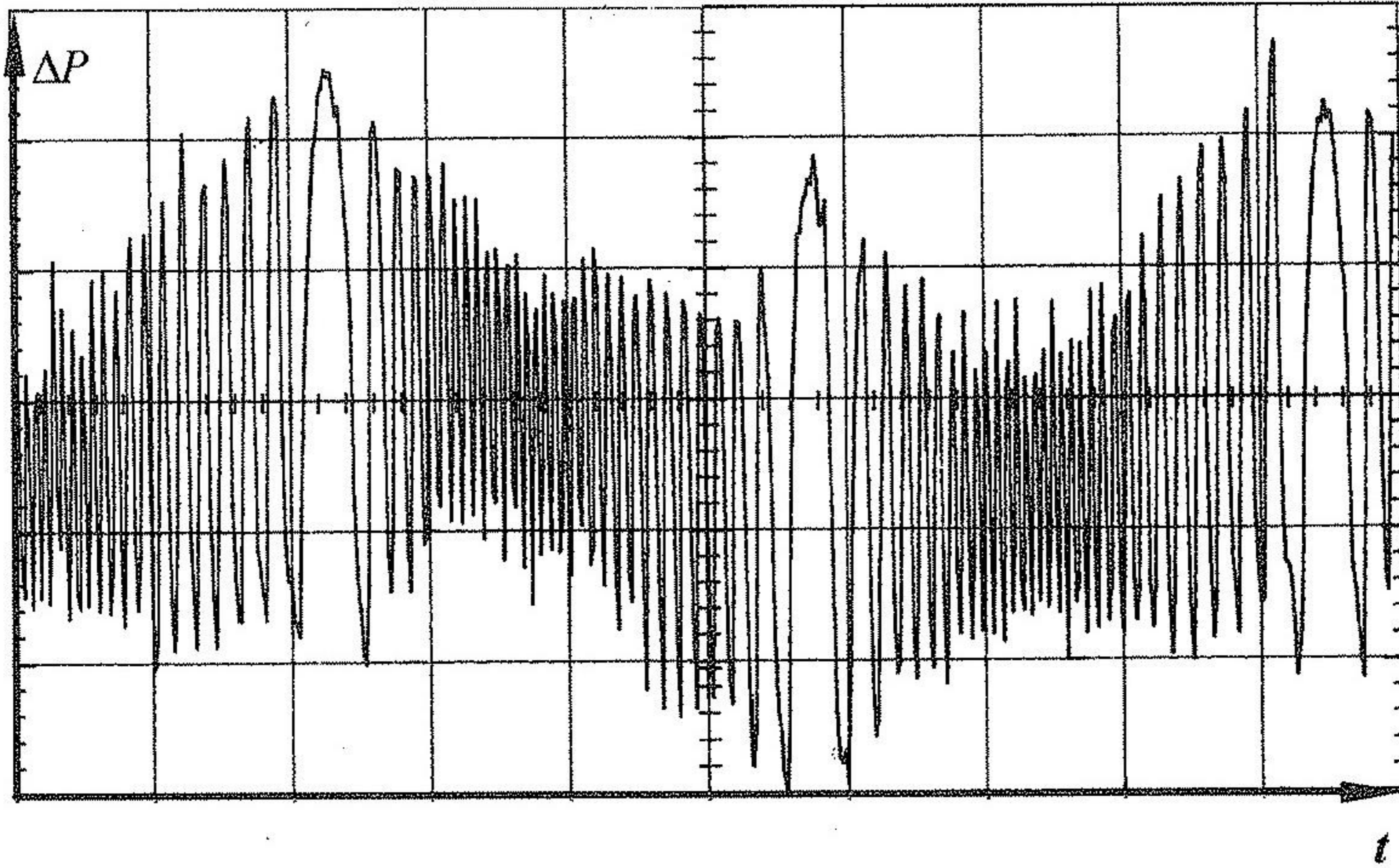
Temassız titreşim ölçümleri amacıyla kurulmuş olan düzeneğin bir başka ayrıntısı da 0.4 μm 'nin üstünde olan yerdeğiştirme ölçümlerinin bir başka prensibe göre gerçekleştirilmesidir. Yüksek titreşim seviyelerinde lazer rezonatörünün boyu periyodik bir şekilde, örneğin sinüs şeklinde bir değişim göstermekte ve dolayısıyla diyot lazerinin çıkış gücü aynı şekilde değişmektedir. Bu durumda, lazer çıkış gücünün sinüs şeklinde değişim gösterdiği varsaydığımızda, FD1 fotodiyodu tarafından optiksel sinyale orantılı olarak algılanan elektriksel sinyalin herbir tepe noktası (maksimumu) lazer rezonatörü boyutunun $\lambda/2$ 'lik yerdeğiştirmeye maruz kaldığının göstergesidir. Titreşim periyodu boyunca FD1 çıkışındaki maksimum sayısı belirlenerek ve

$$\Delta L = N \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

şeklinde basit bir ifade kullanılarak yerdeğiştirmenin mutlak değeri hesaplanabilir.

3. ÖLÇÜM SONUÇLARI

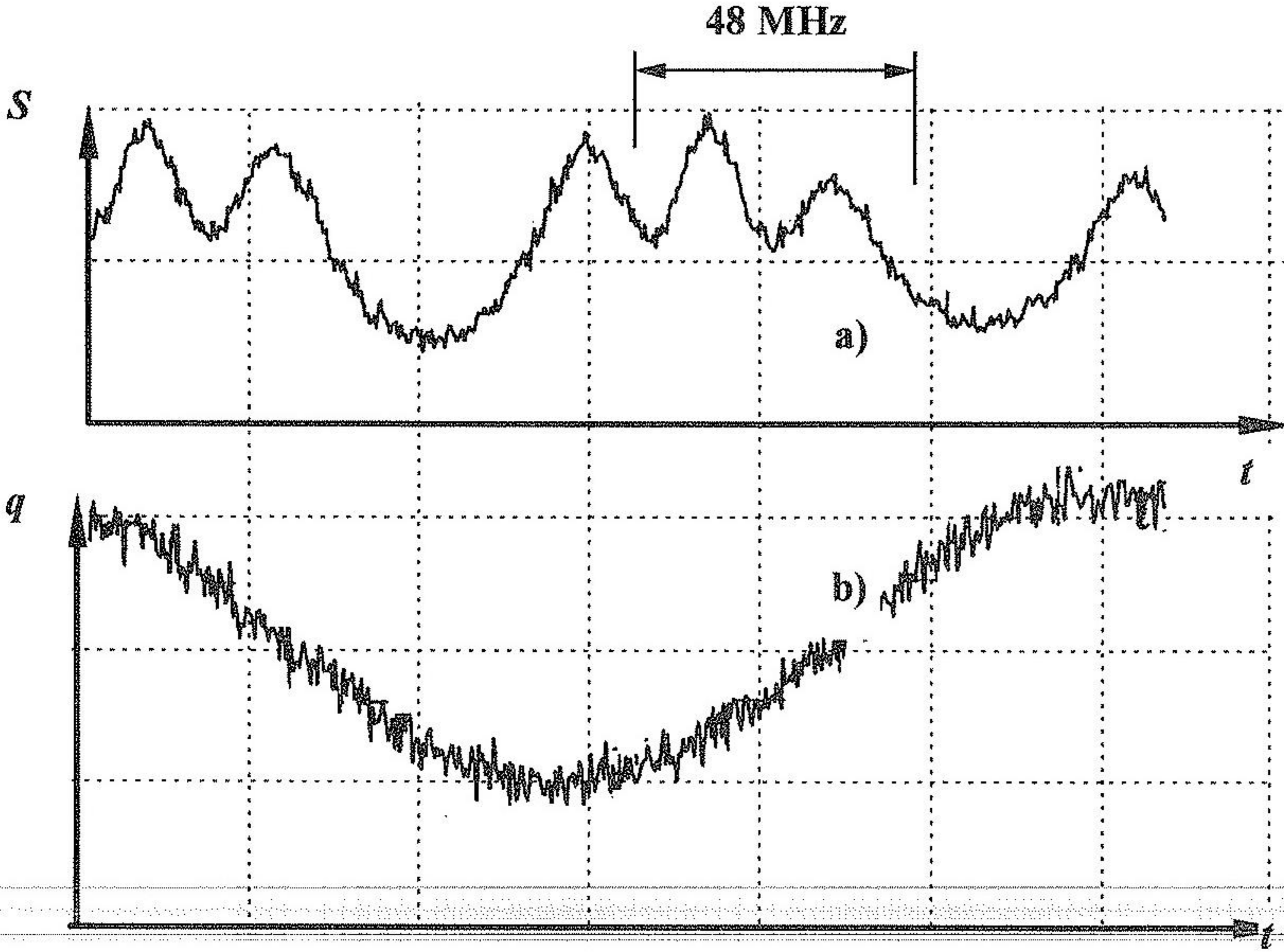
Temassız titreşim ölçme düzeneği ile gerçekleştirilen ölçümleri iki gruba ayırabiliriz. Bunlardan birisi titreşimin yerdeğiştirmesi $\lambda/2$ 'nin üzerindeki durumları kapsamaktayken, diğeri ise $\lambda/2$ 'nin altındaki yerdeğiştirme bölgesinde yapılan ölçümlerdir. Mekanik titreşimlerin genliği yüksek olan bölgede ($\Delta L > 0.4 \mu\text{m}$), hareketli yüzeyin yerdeğiştirmesinden dolayı lazerde modlar arası atlama olayı gözlenir. Lazerin çıkış gücü modülasyona uğramış olur ve FD1 tarafından algılanan sinyalin uzaysal periyodu, diğer bir deyişle iki tepe arasındaki mesafe, λ lazerin dalgaboyu olmak üzere $\lambda/2$ 'lik yerdeğiştirmedir. Yüksek yerdeğiştirmeler bölgesinde yapılan ölçümler sırasında elde edilen sonuçlara bir örnek Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te verilen grafikten titreşen mekanik sistemin yerdeğiştirme değerinin 12 μm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Yüksek seviyeli titreşimlerde lazerin çıkış gücünün zamana göre değişimi

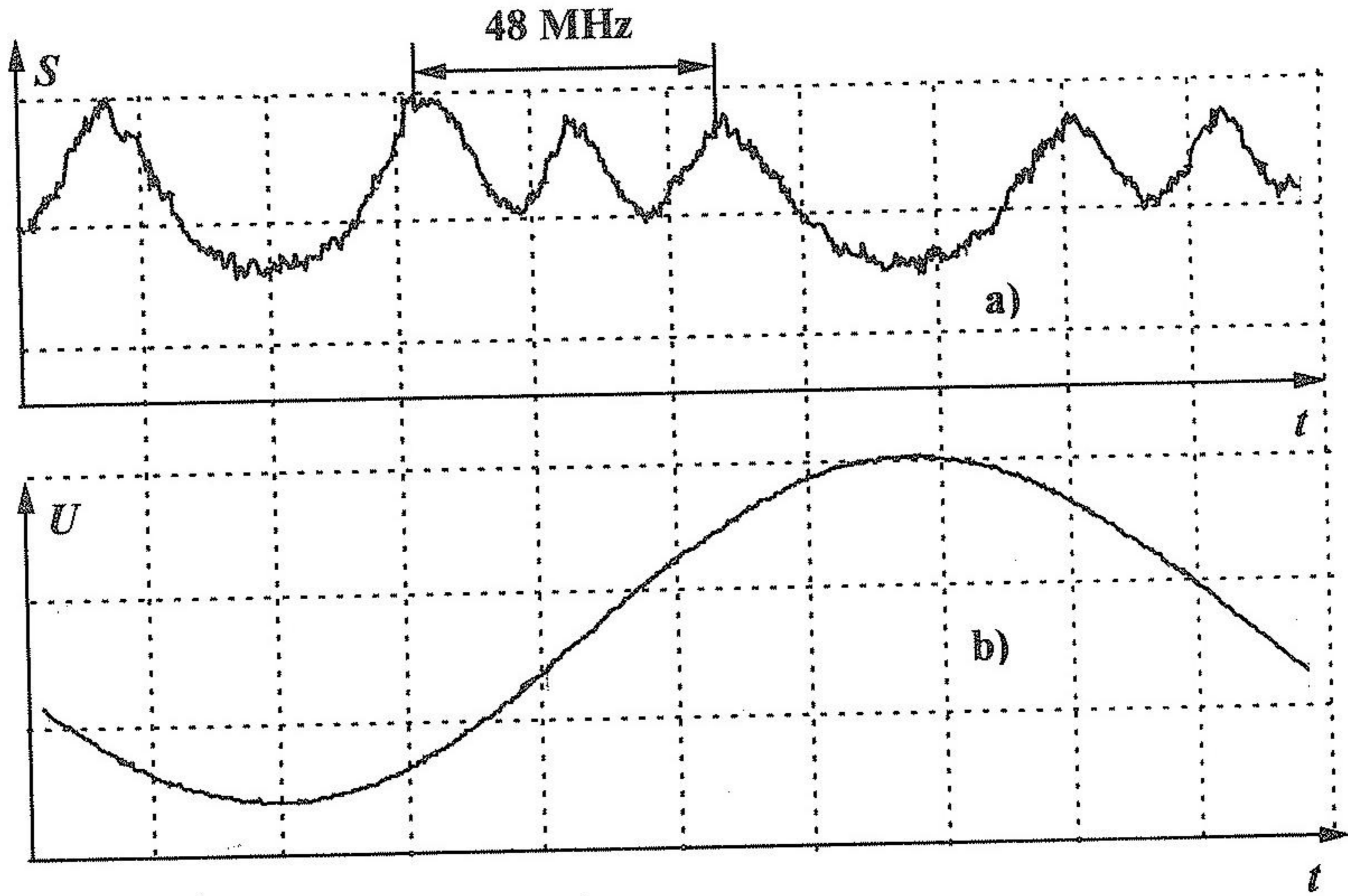
Yerdeğişirmenin genlik değeri $\lambda/2$ 'nin altındaki bölgede temassız titreşim ölçme düzeneğinde hareketli nesne yerine, titreşim metrolojisinde referans standart olarak nitelendirilen ivme ölçer kullanıldı. Kurulmuş olan deney düzeneyinde ivme ölçerin kalibrasyonları yapılmıştır. Kalibrasyonun amacı, ivme ölçerin maruz kaldığı titreşim seviyesini ve bu titreşime karşılık ivme ölçer tarafından üretilen elektriksel yükü bağımsız olarak ölçerek, ivme ölçerin hassasiyet değerinin belirlenmesidir.

Piezoelektrik yapıya sahip ivme ölçer, mekanik titreşime maruz kalırken, mekanik titreşimin genliğine bağlı olarak elektriksel yük üretir [8]. Mekanik titreşimlere maruz kalırken ivme ölçerin çıkış sinyali ve bu titreşimlerden dolayı oluşan lazer frekansındaki değişim Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4a'da ivme ölçerin yüzeyinin titreşiminden dolayı lazer frekansının zamana göre değişimi gösterilirken, Şekil 4b'de ise bu titreşim karşılığında ivme ölçerin çıkışında oluşan elektriksel sinyalinin değişimi verilmiştir.



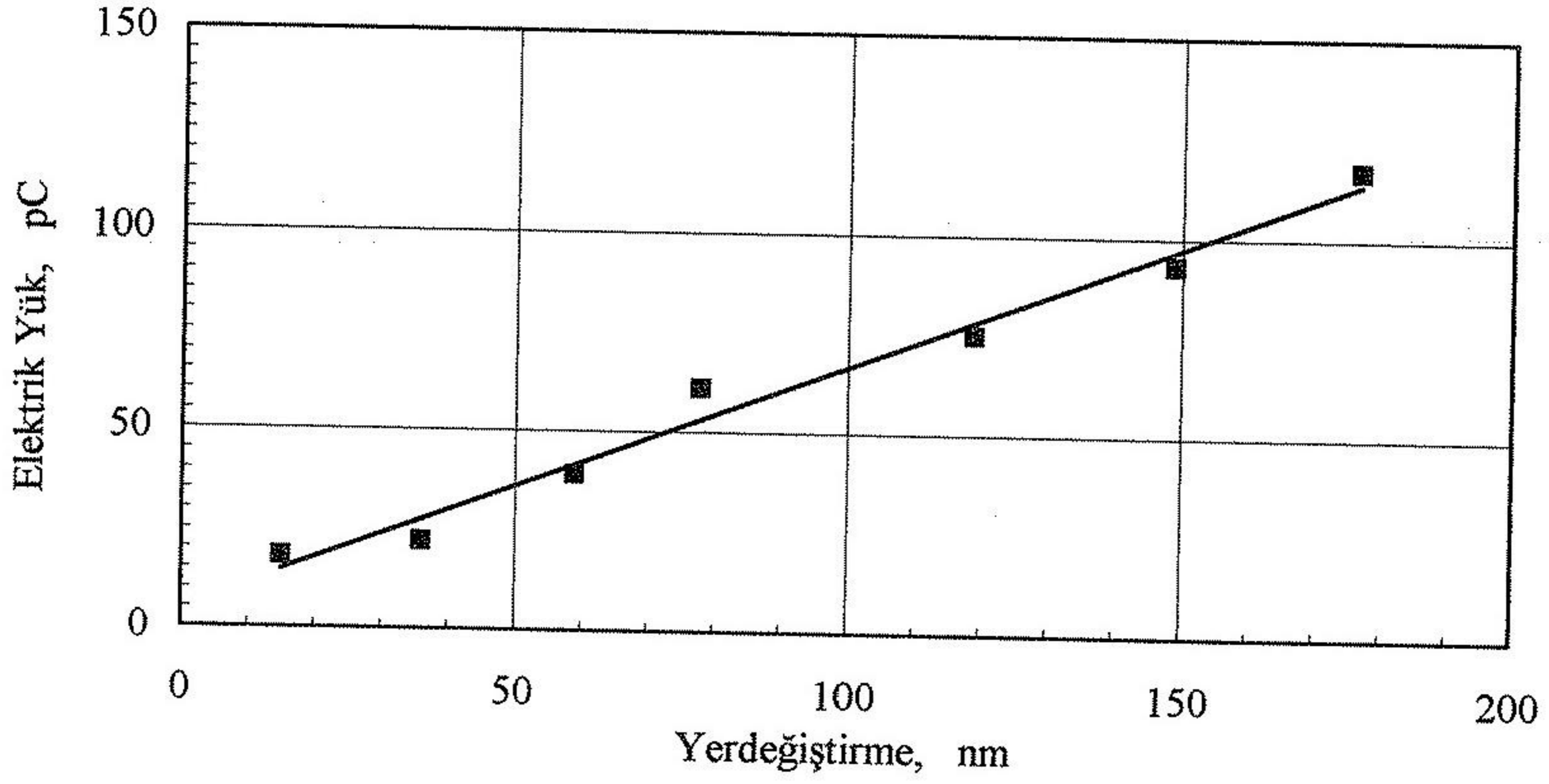
Şekil 4. Zamana bağlı olarak lazer frekansının (a) ve ivme ölçer çıkışındaki elektriksel yükün (b) değişimleri

Ölçümler sırasında titreşim frekansları 160 Hz ve 500 Hz olarak seçilmiştir. Titreşimden dolayı lazer frekansındaki değişimin uygun bir şekilde ölçülmesi için lazerin akımı 24 MHz frekansında module edilmiştir. Titreşim sırasında (titreşim periyodunda) oluşan lazer frekansındaki değişim 48 MHz'dir. Daha sonra ivme ölçer sabit iken, PZT'ye elektriksel sinyal uygulanır ve sinyalin genliği lazer frekansında aynı değişimi yakalayacak şekilde ayarlanır. Bu işlem sonucunda elde edilen veriler Şekil 5'te gösterilmiştir. Böylece hareketli nesnenin yerdeğiştirmesinden dolayı ve eşitlik (1)'de kullanılacak olan lazer frekansındaki değişim $\Delta\nu$ belirlenir. K katsayısının değeri ise Şekil 5'ten ve PZT'nin kalibrasyon sonuçlarından bulunur. Yapılan hesaplamalara göre verilen örnekte yerdeğiştirme değeri 15 nm olarak belirlenmiştir. Bunun karşılığında ivme ölçer çıkışındaki elektriksel yük Brüel & Kjaer Tip 2650 Şartlandırıcı Yükselteç ve hassas voltmetre kullanılarak ölçülür. Yerdeğiştirme ve elektriksel yük değerleri ile ivme ölçerin yükün ivmeye oranı olarak tanımlanan hassasiyet değeri belirlenir.



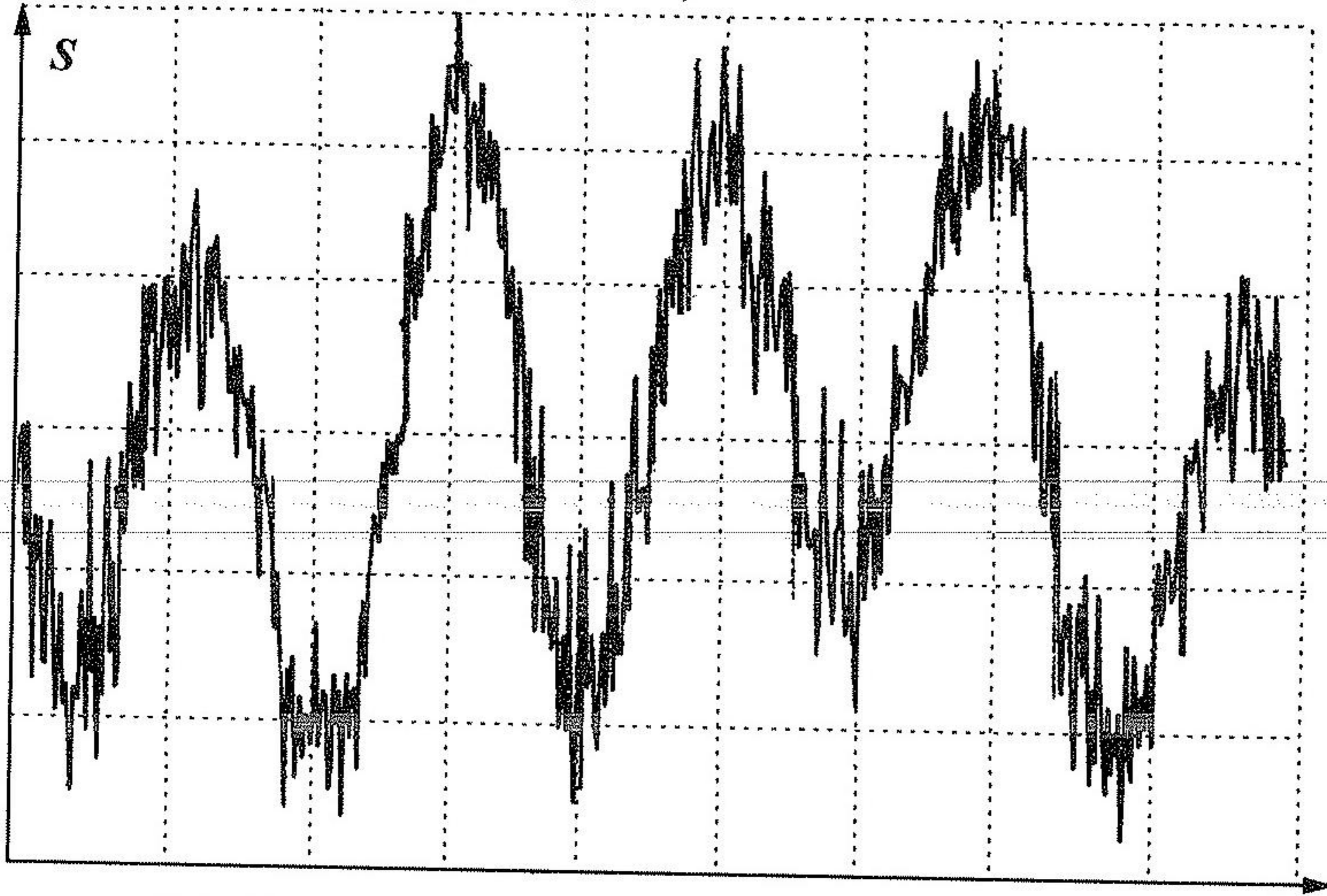
Şekil 5. Zamana bağlı olarak: lazer frekansının (a) ve PZT'ye uygulanan elektriksel sinyalin (b) değişimleri

Referans ivme ölçerin yüksek titreşim seviyelerindeki kalibrasyonu genellikle Michelson enterferometresi ve girişim saçak sayma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir [9]. Ancak düşük titreşim seviyelerinde adı geçen yöntemle bu tür kalibrasyonun yapılması mümkün değildir. Bu çalışmada 160 Hz frekansında 15-180 nm yerdeğiştirme seviyelerinde piezoelektrik ivme ölçerin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen veriler Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yerdeğiştirme değerine göre ivme ölçerin çıkışındaki elektriksel yükün değişimi

Side-band spektroskopi tekniği ile gerçekleştirilen yerdeğiştirme ölçümlerinin alt limiti (15 nm) UME yapımı Fabry-Perot enterferometresinin spektral çözünürlüğü (20 MHz) ile sınırlıdır. Daha küçük yerdeğiştirme ölçümlerinde lazer frekansı, Fabry-Perot rezonans genliğinin yarısına karşılık gelen noktaya ayarlanmıştır. Hareketli yüzeyin titreşiminden dolayı oluşan lazer frekansının 10 MHz'den küçük modülasyonu Fabry-Perot enterferometresinin çıkışındaki sinyalde sinüs şeklinde modülasyon oluşturur (Şekil 7).



Şekil 7. Fabry-Perot enterferometresinin eğimine ayarlanmış lazer frekansındaki değişimden kaynaklanan çıkış sinyali modülasyonu

Module edilmiş sinyalin genliği Fabry-Perot enterferometresi rezonansının tam genliği ile karşılaştırarak, modülasyona sebep olan yerdeğiştirmenin mutlak değeri belirlenir. Şekil 2 ve Şekil 7 karşılaştırıldığında ivme ölçerin maruz kaldığı yerdeğiştirme değeri (1.4 ± 0.5) nm olarak bulunmuştur.

SONUÇ

Dış kaviteli diyot lazeri ve side-band spektroskopisi tekniği kullanılarak temassız titreşim ölçme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan yöntemle çeşitli nesnelere 1 nm - 12 μ m aralığındaki yerdeğiştirmeleri ölçülmüştür. Kurulmuş olan temassız titreşim ölçüm sisteminin doğruluğu 0.5 nm olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. A.J.P.vanHaasteren, H.J.Frankena; Real-time Displacement Measurement Using a Multicamera Phase-stepping Speckle Interferometer, *Applied Optics*, pp.4137-4142, vol.33, No.19, 1994
2. T.Hatsuzawa, Y.Tanimura, K.Toyoda; Acompact Laser Interferometer with a Piezodriven Scanner for Metrological Measurements in Regular SEMs, *Rev.Sci.Instrum.*,pp.2510-2513, 65(8),1994
3. H.J.von Martens; Interferometric Counting Methods for Measuring Displacements in the Range 10^{-9} m to 1 m, *Metrologia*, pp.163-170, 24,1987
4. R.W.Fox, C.S.Weimer, L.Hollberg, G.C.Turk; The Diode Laser as a Spectroscopic Tool, *Spectrochimica Acta Rev.*, pp.291-299, vol.15, No. 5, 1993
5. H.Takahashi, C.Masuda, Y.Gotoh, J.Koyama, Laser Diode Interferometer for Vibration and Sound Pressure Measurements, *IEEE Trans. On Instr. and Meas.*, pp.584-587, vol.38, No.2, 1989
6. L.Hollberg, M.Ohtsu; Modulate Narrow-linewidth Semiconductor Lasers, *Appl.Phys.Lett.*, 944-946, vol. 53 (11), 1988
7. R.Gamidov, M.Çetintaş, E.Sadıkıhov, V.Sautenkov, Diode Lasers with External Optical Feedback for Small Displacement Measurements, In: *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, pp.126-127, 1996