

МЕТОД ЗА СЧЕМАНЕ НА АКУСТИЧНИ ВЪЛНИ, МОДУЛИРАЩИ ОПТИЧЕН СИГНАЛ В ОПТИЧНО ВЛАКНО.

доц. д-р А. Тошков, доц. д-р Д. Гичев

METHOD FOR DISTRIBUTED DEMODULATION OF ACOUSTIC WAVES IN OPTICAL FIBER

Assoc. prof. PhD. A, Toshkov, assoc. prof. PhD. D, Gichev

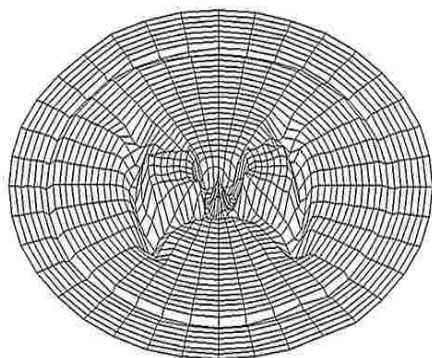
Abstract:

The article reviews the possibility of using optical fibers as a distributed acoustic sensor. An proposal is given to develop a method for sampling of the acoustic signal and its storage in the form of a discrete number of points for further processing, for comparison or audition of audio signal. The method is based on the use of nonlinear effects and Raman and Brillouin in optical fibers and analysis of information obtained by measuring on the principle of BTDR (Brillouin time-domain reflectometry) и RTDR (Raman time-domain reflectometry).

Keywords: Acoustic wave, Optical Fiber, Brillouin, Raman

Въведение

При въздействие на механична акустична вълна върху оптично влакно, налягането на вълната предизвиква промени в структурата на влакното. Били те и микроскопични, тези промени водят до промяна на параметрите на разпространяваща се през оптичното влакно светлинна вълна.



Фиг. 1 Промяна на структурата на оптичното влакно при радиален натиск върху него

Когато светлината е полихроматична, това води до загуба на светлинна енергия, поради промяната на локалния коефициент на пречупване в ядрото на влакното, както и до промяна на загубите от микро огъвания. Когато светлинната вълна е монохроматична, това води до промяна на фазата на разпространяващият се светлинен лъч или мод, която също може да бъде анализирана. Доколкото и в двата случая говорим за промяна на интензитета на светлинния сигнал, то става въпрос за директна модулация на мощността на светлинния сигнал, появила се под

въздействието на звуковата вълна, попаднала върху определен участък от влакното [1].

Освен появата на модулираща съставка върху оптичната носеща, дължаща се на промени в молекулярният състав на стъклото, във влакното се появява и чисто механична акустична (или хиперзвукова) вълна, която се разпространява с ниска (спрямо тази на светлината) скорост в оптичното влакно, предизвиквайки затихваща вторична модулация на оптичната носеща по пътя на своето разпространение.

Освен спонтанната акустична вълна съществуваща във влакното, по дължината на едно оптично трасе е възможно влакното да попадне под въздействието на различни външни акустични вълни. Променяйки локалната структура на влакното в областта на въздействие, всяка такава вълна модулира оптичната носеща и възбужда допълнителна акустична вълна в оптичното влакно. Всяка различна акустична вълна, разпространявайки се по влакното, модулира вторично оптичната носеща в различно време, от момента на появата на въздействието.

Нека си представим следната ситуация:

Имаме една оптична линия с определена дължина – например 20 км. На входа на тази линия сме подали оптичен сигнал с постоянна мощност. Оптичното влакно преминава по трасе, което попада в зоната на множество източници на акустични вълни. В този случай на изхода на линията сигналът ще бъде модулиран по оптична мощност от всички тези източници взети заедно. Дълбочината на модулацията ще бъде пропорционална на силата на въздействие на всеки отделен източник на акустичен сигнал върху влакното. Допълнително, породилите се във влакното различни акустични вълни, движещи се с ниска скорост ще предизвикват затихваща и променяща се във времето (поради това, че акустичната вълна се движи по влакното) вторична модулация на оптичната носеща.

Ако в края на влакното снемем обвивката на оптичната носеща, т.е. демодулираме оптичната носеща, на изхода на влакното, на практика ще се получи един изключително сложен сигнал, съдържащ в себе си информация за всички източници на акустични сигнали едновременно, но, тази информация ще отразява тяхното състояние в различен момент от времето, поради тяхното различно разположение по трасето. Освен това, информацията ще съдържа и множество сигнали, породени от допълнителната модулация, дължаща се на движещите се по влакното в определени участъци, затихващи звукови акустични вълни.

Идеята на тази статия е, да се предложи метод за използване на влакното като акустичен сензор за разпределено прослушване на влакното по неговата дължина посредством използването на OTDR или подобна на нея технологии.

Предпоставки

Нелинейните ефекти на прехвърляне на енергия от една дължина на вълната на друга в следствие на различни механизми на взаимодействие на фотоните с молекулите на материала от който е изградено оптичното влакно могат да послужат за основа на едно такова изследване.

Един от тези ефекти е Брилюеновото разсейване, което може да бъде обяснено като чисто класически ефект, в който светлината се отразява от спонтанно или принудително появила се в оптичното влакно акустична вълна. Доколкото тази оптична вълна се движи по влакното, то светлината отразена от нея е Доплерово отместена на различна честота, или дължина на вълната. Скоростта на акустичната вълна лесно може да бъде определена от големината на честотното отместване на отразената светлина. Освен от качествата на материала, неговата структура и наличие на легиращи материали, тази скорост зависи от температурата на влакното и от механичните въздействия на което то е подложено. Поради тази причина, обратно разсеяният Брилюенов сигнал носи

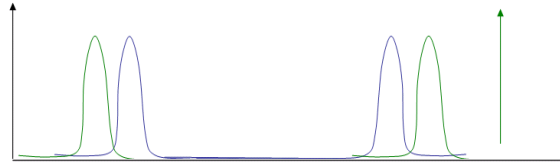
информация за тези три параметъра – скорост на звуковата вълна, температура на влакното и налягане на което е подложено.

Доколкото скоростта на звуковата вълна в едно оптично влакно е относително постоянна величина, поради това, че зависи от качествата на материалите от които е изградено влакното, то тя лесно може да бъде определена. По тази причина, тази величина е и относително постоянна във времето.

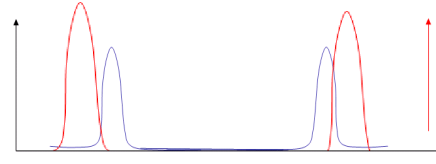
Сериозен проблем, обаче е да се определи честотното отместване, което се дължи на температурата на влакното и на натиска на който е подложено то. За решаването на този проблем, напоследък се използва така наречената техника на Brillouin time-domain reflectometry (BTDR). При тази техника, подобно на Optical Time-domain reflectometry – (OTDR) – кратък светлинен импулс се изпраща по влакното и се анализират малки порции, взети на определено време от обратно разсеяният Брилюенов сигнал в оптичното влакно. Времената за вземане на тези дискрети са така разчетени, че да отговаря на дължината на светлинният импулс изпратен по оптичното влакно, а измерените стойности на параметрите на получения дискрет да дават информация за определена част по дължината на оптичното влакно.

В същност, методът (BTDR) представлява прецизно измерване на интензитета и честотното отместване на тези порции светлина, върнали се обратно в следствие ефекта на Брилюен, взети за много кратък период от време. Честотното отместване се измерва по отношение на дължината на вълната или честотата на излъчения импулс. Различни схемни решения за това са публикувани и патентовани. За съжаление, тази техника е ограничена от нивата на измерване на интензитета. Обратно разсеяният Брилюенов сигнал има енергия по-малка от милионни части от мощността на излъчения сигнал. Добавяйки към това и собственото затихване на влакното, стигаме до ограничението – праг на чувствителност на приемника, обработващ Брилюеновият сигнал. За целта, в някои разработки се предлага използването на големи входни мощности, при което се получава така нареченото Стимулирано Брилюеново Разсейване (SBS), при което нивото на обратния отразен сигнал е значително по-високо.

Рамановото разсейване е квантово-механичен ефект, при който един фотон се разсейва от молекулярните вибрации. При взаимодействието си с молекулите фотонът отдава или получава енергия, при което разсеяният сигнал е честотно отместен спрямо честотата на основният сигнал. Това отместване е пропорционално на количеството отдадена или получена енергия. Когато фотонът отдава енергия се получава атака наречената Stocks компонента, а когато получава – Anti-Stocks компонента в спектъра на разпространяващите се по оптичното влакно сигнали. Интензитетът на Рамановото разсейване зависи единствено от термалната популация на електроните по енергийните нива на молекулите на стъклото. В този смисъл, интензитетът на Рамановото разсейване зависи само от температурата. Честотното отместване Рамановото разсейване зависи също основно от температурата, както и от това с електрони от кое ниво взаимодействат фотоните. Деформациите на оптичното влакно нямат сериозно отношение към този ефект. Т.е може да се каже, че ефектът на Раман е пряко свързан с промяна на температурата.



Фиг. 2.а Brillouin – DTSS => Strain and Temperature (0.5 °C) variation in optical frequency



Фиг. 2.б Raman – DTS => Temperature Measurements (0.01 °C) - variation in optical frequency and power

Известно е, че нивото по мощност на обратно отразеният Брилюенов сигнал е значително по-високо от това на разпространяващият се в обратна посока светлинен поток в следствие ефекта на Раман.

Например за Stocks компонентата на RS мощността на сигнала е от -50 ... -60 dB относно мощността на постъпилото на входа лъчение. За AntiStocks компонентата е от порядъка на -70...-80 dB.

Спектралната лента при Раман е по-широка. При ефекта на Брилюен, дължината на вълната на обратно отразеният сигнал е много близо до релеевското разсейване – на 10-11 GHz (в рамките на 0.1 nm). Брилюеновското отместване ν_b можем да пресметнем по формулата:

$$\nu_b = 2\nu_a/\lambda_0$$

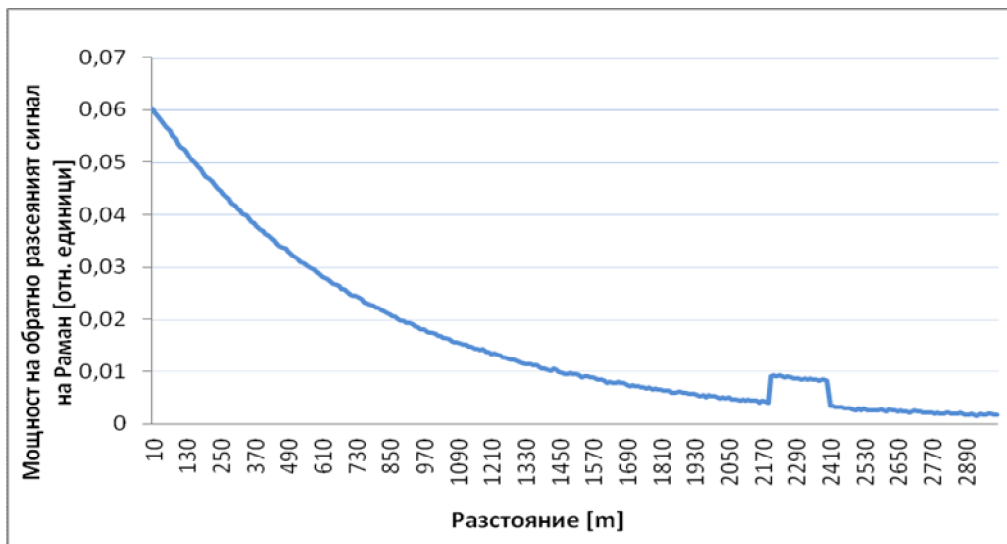
Където $\nu_a \sim 5.103$ m/s. (ν_a - скорост на хиперзвуковата акустична вълна в силиция). За основна дължина на вълната $\lambda_0 = 1550$ nm получаваме отместване $\nu_b = 10$ GHz ~ 0.1 nm

Широчината на спектралната лента на стоксовата компонента при BS също е много тясна – в рамките на 20-60 MHz.

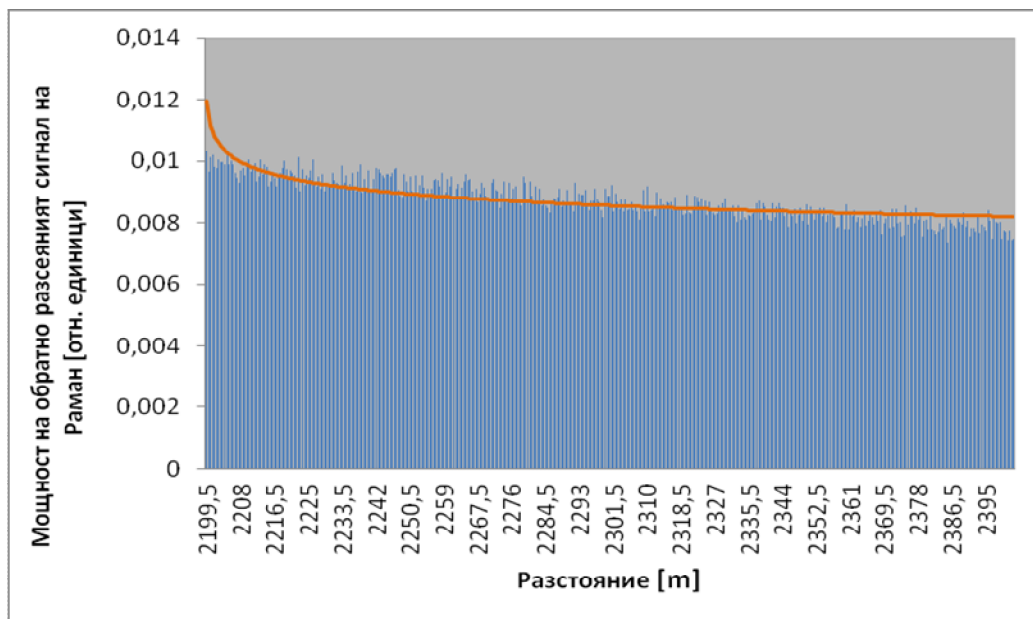
При RS спектърът на обратно отразения сигнал е с широчина около 7 THz и е отместен на 12-13 THz към по-високите дължини на вълните за Stocks компонентата ($\sim 80 - 95$ nm.) [8,9]

Поради тези причини Рамановият обратно разсеян сигнал позволява значително лесно да бъде филтриран и измерена директно оптичната мощност на всеки един дискрет. За да се измери обаче честотното отместване на Брилюеновият обратно разсеян сигнал е необходимо да се използват кохерентни схеми и теснолентови източници на светлина – едномодови настройваеми DFB лазерни диоди, интерферометрични филтри, селфокови лещи или други устройства, посредством които честотното отместване да се преобразува в интензитет, който да бъде измерен и съпоставен. Друг метод е да се използват алгоритми за изчисляване, базирани на Фурие трансформации или др. подобни, в следствие на което да се получи информация за честотното отместване, която след нормализация да се получи в удобен за сравняване цифров вид. В много публикации се докладва, че са постигнати резултати за директно измерване на спектралното отместване [2], а при VTDR то става от порядъка на килохерци и дори стотици херци.

Независимо от начина, по който са реализирани измерванията, съпоставяйки в нормализиран вид резултатите от честотното отместване на Брилюеновата спектрална лента и интензитета на отразения от ефекта на Раман сигнал, можем недвусмислено да определим дали една промяна на параметрите на обратно разсеяните сигнали се дължи само на температурни промени, само на упражнен натиск или и на двете величини едновременно. Оценката лесно може да бъде направена по чисто количествени методи.

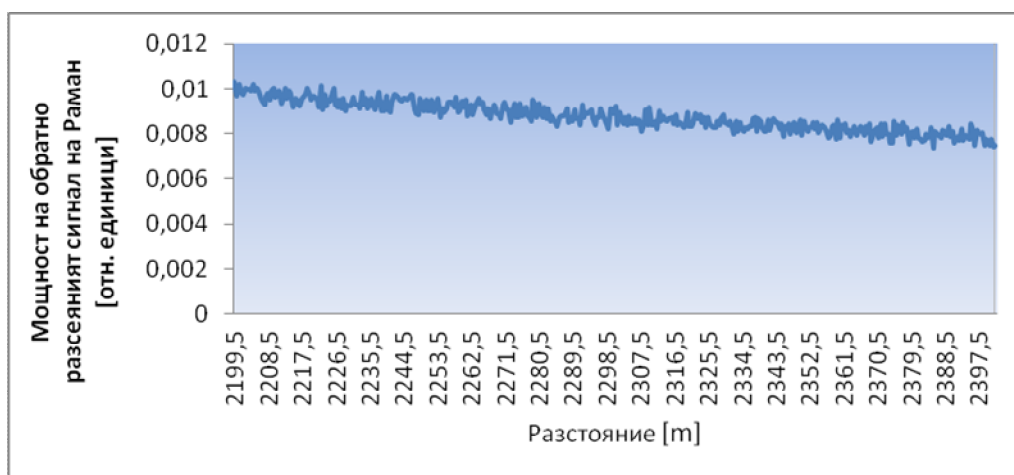


Фиг.3 Изменение на интензитета на спектралната лента на Раман в следствие на промяна на температурата и приложен опън върху влакното в един момент от времето Δt

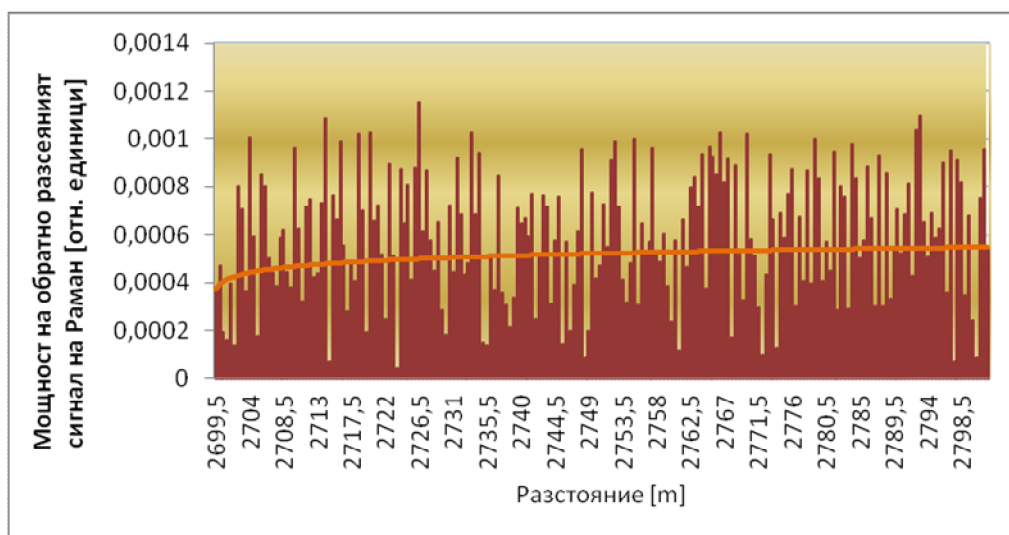


Фиг. 4 Изменение на интензитета на спектралната лента на Раман в следствие на промяна на температурата и приложен опън върху влакното в един момент от времето Δt

На Фиг. 3 е представена графиката на промяната на интензитета на обратно разсеяният Раманов сигнал за едно влакно с дължина 3000 метра, на което частта между 2200 и 2400 метра е поставена в пещ при температура 60°C, при температура на околната среда 25°C. Частта между метър 2700 и 2800 е навита върху компенсатор, като е приложено увеличено, равномерно усилие на опън. Ясно се вижда, че там където температурата е повишена сигналът е с повишен интензитет. Там, където влакното е подложено на опън при обратно разсеяният Раманов сигнал няма промяна на интензитета. На Фиг. 4 са показани стойностите на дискретите от съответните измервания само за зоната на въздействие на температурата. На фиг. 5 е показан линеен сплайн от първа степен, описващ характера на кривата, описана от измерените стойности на дискретите.

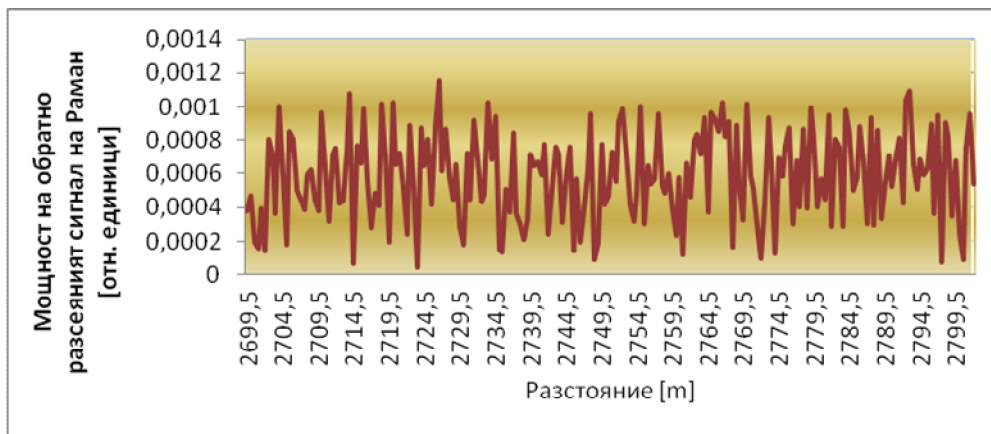


Фиг. 5 Промяна на интензитета на спектралната лента на Раман в следствие влиянието на температурата в един момент от времето Δt



Фиг. 6 Промяна на интензитета на спектралната лента и крива на средната мощност на Раман в следствие влиянието на опън в дискретен вид в един момент от времето Δt

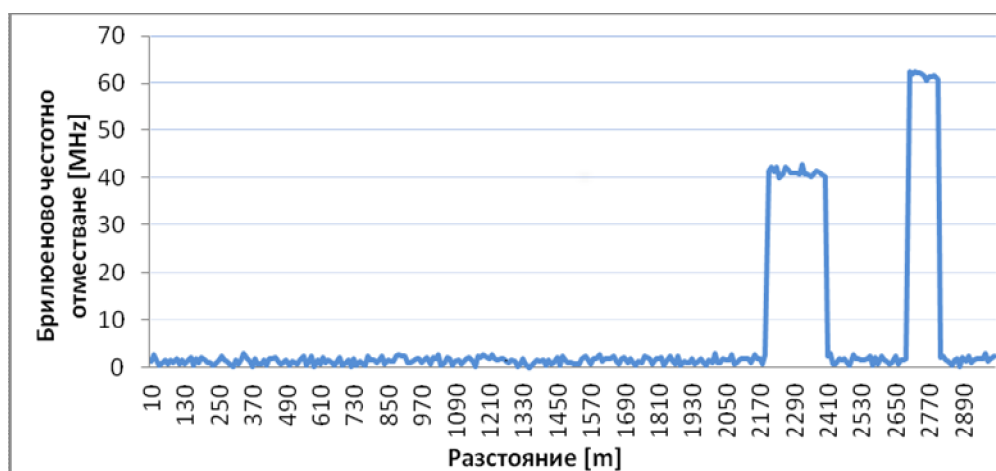
На фиг. 6 и 7 са показани стойностите на дискретите и сплайна от първа степен в областта на въздействие на опън.



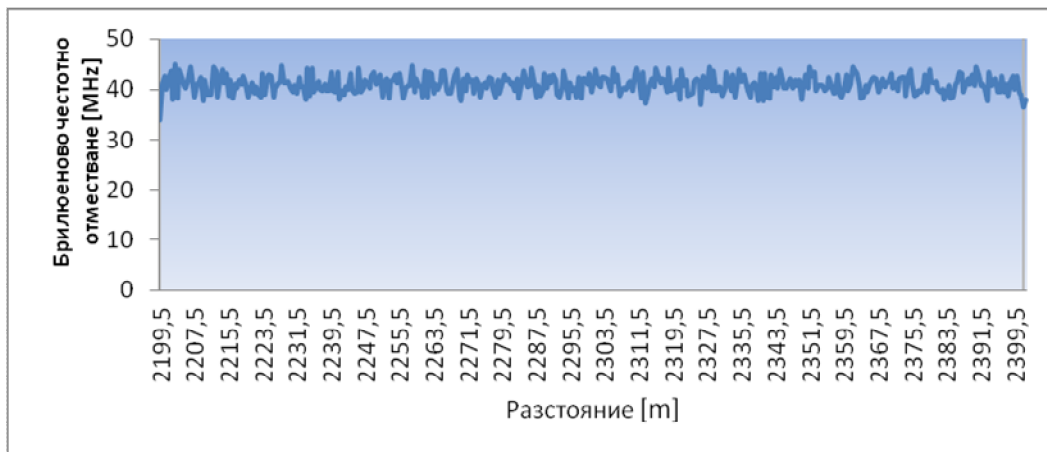
Фиг. 7 Промяна на интензитета на спектралната лента на Раман в следствие влиянието на опън в дискретен вид в един момент от времето Δt

Лесно може да се забележи разликата в резултатите между действието на температурата и опъна – около три порядъка по мощност (това се вижда от трендовете на фиг. 4 и 6). Шумовата промяната на интензитета на сигнала навсякъде по дължината на влакното (фиг. 5,6,7) е с ниска стойност по мощност – фиг. 6, и малка девиация. Отчетливо може да се направи извод за промяна на температурата в нагретия участък на влакното.

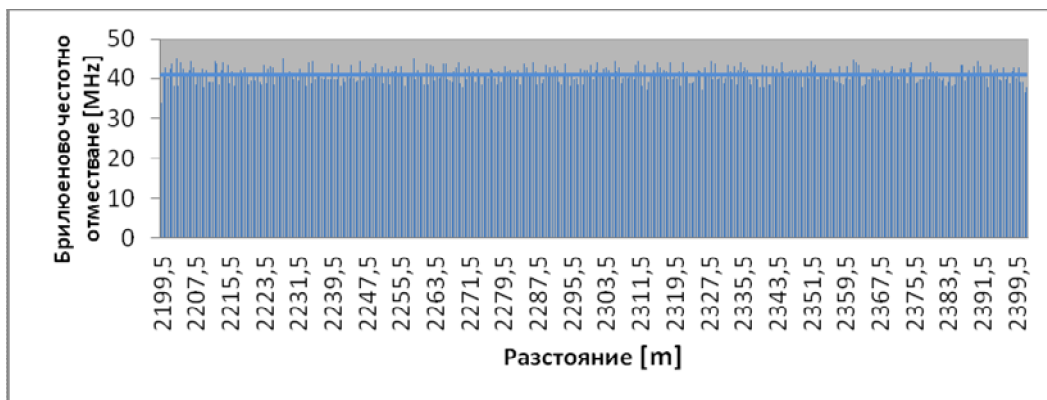
Изменението на честотното отклонение при същата постановка на центъра на честотната лента на Брилюен. Измерените дискретни стойности и сплайн от първа степен на кривите в тестовите участъци са показани на фиг. 8,9,10,11,12.



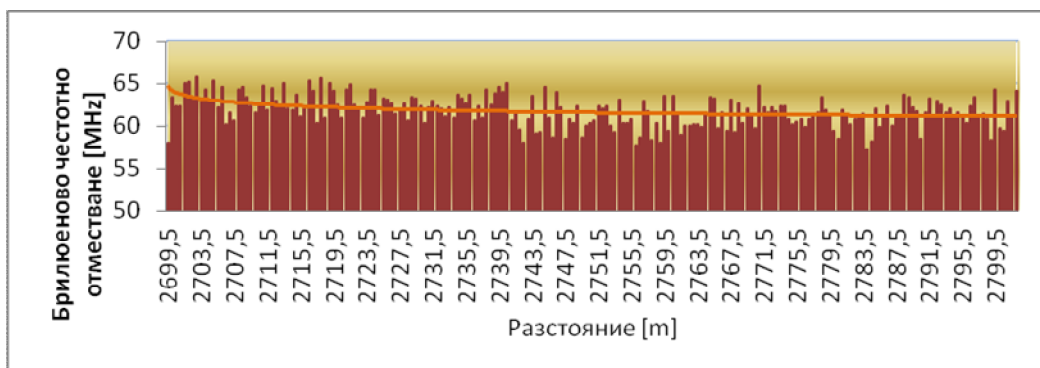
Фиг. 8 Изменение на честотното отместване на спектралната лента на Брилюен в следствие на промяна на температурата и приложен опън върху влакното в един момент от времето Δt



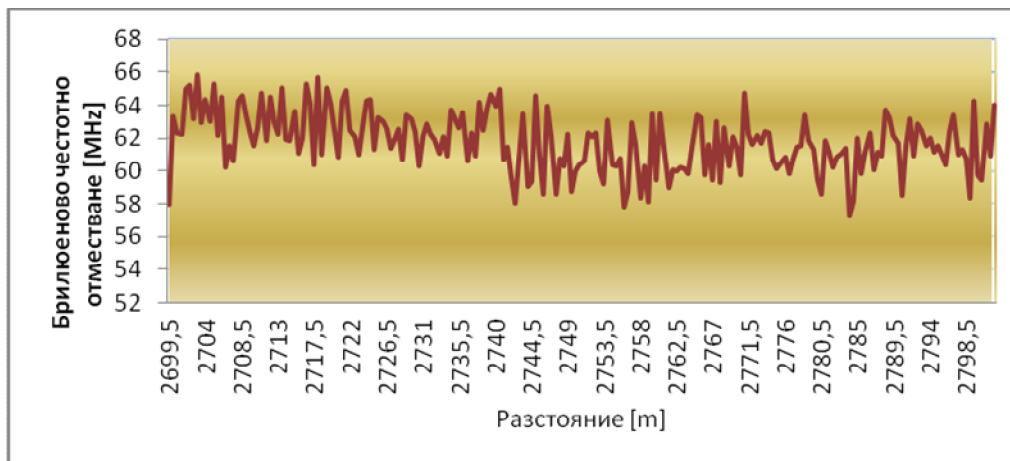
Фиг. 9 Промяна на честотното отместване на спектралната лента на Брилюен в следствие влиянието на температурата в един момент от времето Δt



Фиг. 10 Честотно отместване на спектралната лента на Брилюен в следствие влиянието на температурата в дискретен вид в един момент от времето Δt



Фиг. 11 Честотно отместване на спектралната лента на Брилюен в следствие влиянието на опън в дискретен вид в един момент от времето Δt



Фиг. 12 Промяна на честотното отместване на спектралната лента на Брилюен в следствие влиянието на опън в дискретен вид в един момент от времето Δt

Ако отместването в следствие на приложеният опън е в рамките на 60 MHz, то девиацията на насложеният сигнал в следствие на други фактори (акустичните вълни) е около 10 MHz. А това е стойност, която може да бъде измервана с достатъчна точност.

Доколкото промяната на температурата на влакното, както и на опъна или натиска върху него са относително бавни процеси във времето, а възможността за измерване на честотното отместване в следствие на акустичните вълни е на лице, то стои въпроса – измервайки честотното отместване на Брилюеновият сигнал и обработвайки бързите промени на измерените стойности на честотното отместване – т.е филтрирайки една честотна лента в областта на по-високи честоти – например в диапазона 20Hz – 20 KHz – възможно ли е да получим информация за звуковата вълна, модулираща оптичната носеща на мястото, от където се получава съответният дискрет.

Теоретично, в това не би трябвало да има никакъв проблем. Стига точността на измерването на честотното отместване да е достатъчно висока.

За радост, в последните години методите за измерване на честотното отместване на Брилюеновият сигнал напреднаха много. Благодарение на интерферентни методи, стана възможно изключително прецизното (в рамките на килохерци) отчитане на тези отмествания в реално време, преобразувайки ги директно в ниво по оптична мощност.

При тези условия напълно възможно да бъдат направени следните измервания:

Използвайки и RTDR (Raman time-domain reflectometry) и BTDR (Brillouin time-domain reflectometry) ние можем да получим резултатите показани на фиг. 3 – 12. Използвайки алгоритъм за търсене на осреднена стойност за всеки дискрет и за двата типа резултати, ние можем да изглаждаме кривите показани на тези фигури, за получаване на по-достоверни данни и по голяма точност при отчитане на температурните промени и промените от натиск или опън на влакното. За тази цел, многократното измерване може да подобри точността, а високата скорост на повторение на измерванията може да осигури по добри динамични резултати по отношение на измерваните параметри – т.е да се установяват по бързи промени на температурата или механичните въздействия върху влакното с голяма точност. Подробно, относно

принципите на провеждане на тези измервания може да се запознаем в голям брой публикации и патенти, някои от които са [3,4,5,6,7,8, 9, 10].

Какво ще се получи обаче, ако скоростта на повторение на тези измервания се увеличи максимално. До колко може да бъде увеличена тази скорост и какво ще се случи, ако вместо да използваме алгоритъм за изглаждане, ние запазваме стойностите на всеки дискрет, за всяко измерване, съответно от RTDR или VTDR рефлектометрично измерване.

Първо – до колко може да се увеличи скоростта на повторение на рефлектометричните измервания.

Ако имаме влакно с дължина 1 км, с $n_1=1.46$, то светлината ще пътува в права посока около $5\mu s$ до неговия край. Още $5\mu s$ са необходими за да се върне отразеният сигнал от края на влакното до неговото начало. Т.е ако ние сканираме оптично влакно с дължина 1km, то минималното време t_{bs} на повторение на измерването по TDR метод ще бъде $10\mu s$.

$$t_{bs} = 2L/v = 2 / 3 \cdot 10^5 \text{ [km]} \cdot n_1 / \text{[km/s]} \approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ [s]} = 10\mu s$$

Това е и минималното време след което можем да излъчим следващ сканиращ импулс.

$10\mu s$ представляват грубо 100KHz честота на повторение. С други думи, можем да получаваме стойност за всеки „номерирани“ дискрет d_i с честота приблизително 100KHz, което по същество е честота на дискретизация на акустичният сигнал, за който носи информация всеки отделен дискрет. Тази информация е получена от съответно място по дължината на влакното, като функция на честотата на снемане на дискретите (съответно времето на снемане на дискретите в приемника) при TDR метода на измерване.

При влакно с дължина един километър, максималната честота дискретизация е 100KHz, при което съответно можем да бъде възстановен качествено аналогов сигнал с честота до 50 KHz. При влакно с дължина съответно 10 km максималната честота на дискретизация ще бъде 10KHz, което отговаря на възстановяване на аналогов сигнал с честота 5KHz.

Пространствената разделителна способност за измерване на интензитета на светлинната енергия или спектралното изместване при DTR технологията зависи от два параметъра – Δt_s , бързодействие на детектиращата част и t_{imp} - широчина на излъченият сканиращ импулс в права посока. Времето получаване на отчетите Δt в рамките на едно измерване с един сканиращ импулс трябва да бъде съизмеримо и по-малко от широчината на сканиращия импулс. Това е така, защото при по-висока скорост на детектиране светлинното петно с дължина L_{sp} все още няма да е преминало през двете съседни точки по дължината на оптичното влакно, за които се прави измерването. В този случай няма да е на лице пълна реакция между фотоните от светлинното петно и молекулите на стъклото.

Извод

Ако вместо да използваме алгоритъм за усредняване на резултатите от последователните измервания (както при стандартните OTDR, VTDR и RTDR методи), ние запазваме стойностите, получени за всеки дискрет с пореден номер d_i , от всяко измерване за определен период от време Δt и подложим на обработка информацията, получена за всеки отделен дискрет във времето T

$$T = (\Delta t + t_{rel}), n$$

$$T_i = (\Delta t + t_{rel}) i$$

където:

T – е времето на сканиране на влакното от един начален момент нататък

T_i – момент от времето в който е направено i -тото измерване с i -тия сканиращ импулс

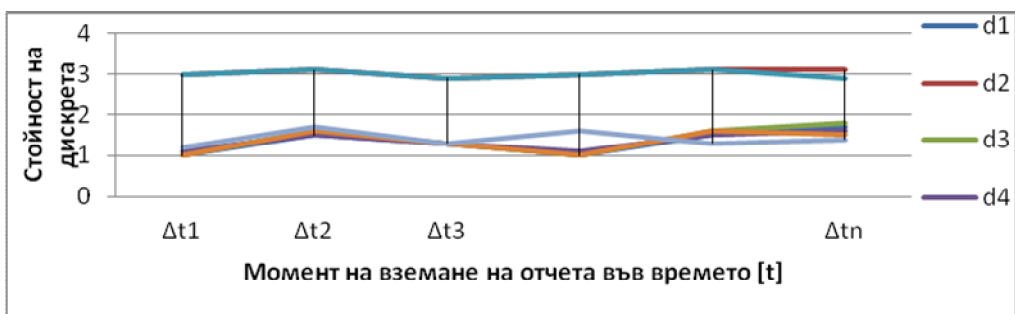
Δt - е времето за снемане на една поредица от отчети

t_{rel} - е времето на релаксация, т.е между приключването на сканирането на резултатите от един сканиращ импулс и стартирането на следващия.

i, n - е брой на сканиращите импулси, които сме изпратили в съответния момент, то можем да възстановим акустичният сигнал, предизвикал тези промени, например в отместването на спектралната лента на Брилюеновият обратно разсеян сигнал.

Принцип на метода е показан на табл 1 и на фиг 13.

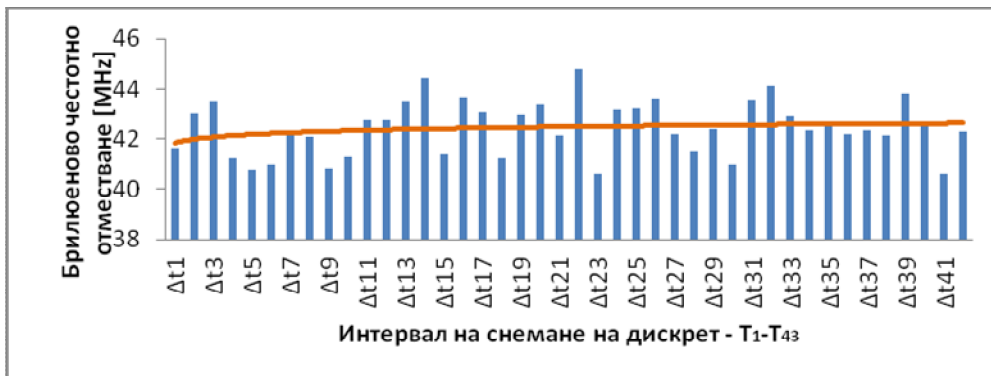
T	$T_1 = (\Delta t + t_{rel})$	$T_2 = (\Delta t + t_{rel}) \cdot 2$	$T_3 = (\Delta t + t_{rel}) \cdot 3$			$T_n = (\Delta t + t_{rel}) \cdot n$
	Δt_1	Δt_2	Δt_3			Δt_n
d1	1	1,5	1,3	1	1,5	1,7
d2	3	3,1	2,9	3	3,1	3,1
d3	1	1,6	1,3	1	1,6	1,8
d4	1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	1,6
.	3	3,1	2,9	3	3,1	2,9
.	1	1,6	1,3	1	1,6	1,5
dm	1,2	1,7	1,3	1,6	1,3	1,4



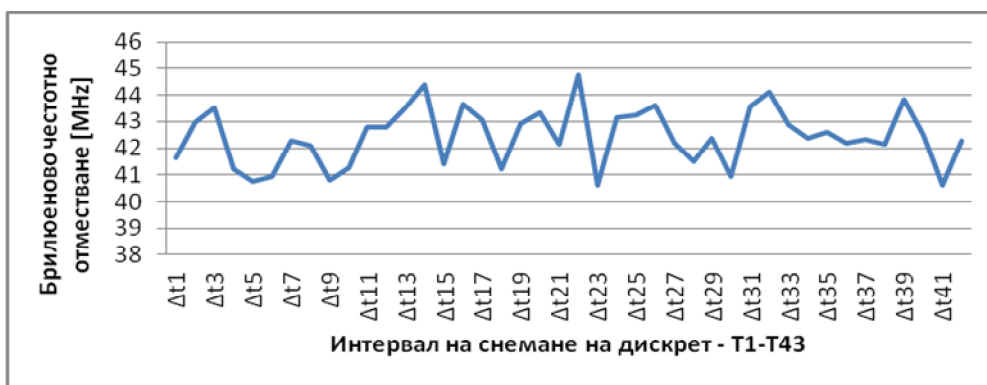
Фиг. 13 Функции описвани от стойностите на всеки един номериран дискрет d_m във

d_i^k е дискретната стойност, получена за дискретната поредица d_i , в момента Δt_k , когато е изпратен k -тия сканиращ импулс.

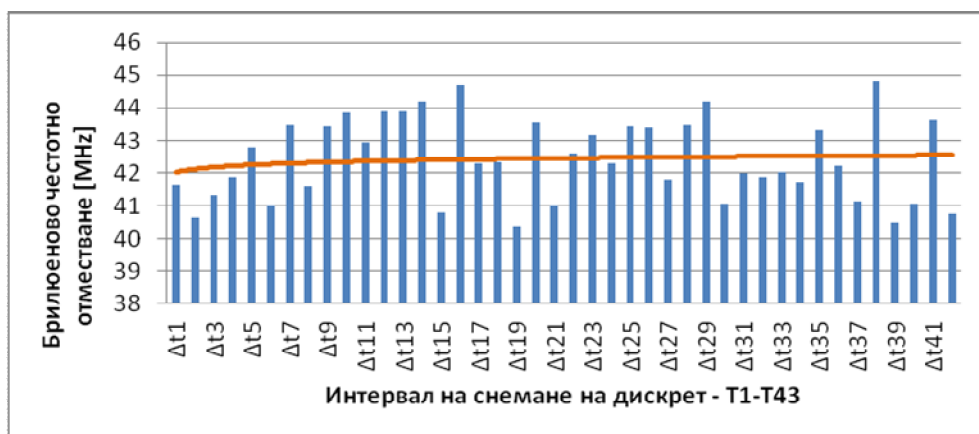
Ако например измерваме стойността на Брилюеновото отместване на всеки 10ns, в рамките на едно измерване с един тестов сканиращ импулс $\Delta t_k \approx 10 \mu s$ ние можем да получим пространствена разрешаваща способност от порядъка на 1 метър за влакно с дължина $L=1 \text{ km}$. Да предположим, че сме записали стойностите, получени при всяко едно различно измерване с различни сканиращи импулси – в случая 42 измервания и направим графика на дискрет d_{1300} , с пореден номер 1300, даващ информация за спектралното изместване, получено в следствие на въздействието на акустична вълна на метър 1300 от дължината на влакното. Резултатите от една такава обработка биха имали следният вид фиг. 14 и 15.



Фиг. 14 Стойност на честотното отместване на метър 1300 в различни моменти от времето $t_i = (\Delta t + t_{rel}).i$



Фиг. 15 Крива описваща промяната на честотното отместване на метър 1300 в различни моменти от времето $t_i = (\Delta t + t_{rel}).i$



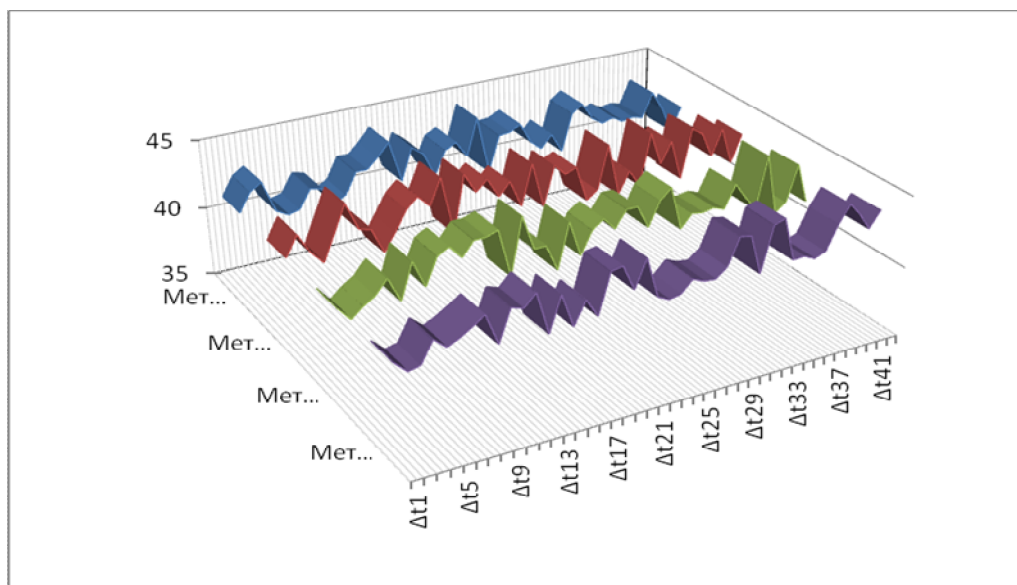
Фиг. 16 Стойност на честотното отместване на метър 1500 в различни моменти от времето $t_i = (\Delta t + t_{rel}).i$



Фиг. 17 Крива, описваща промяната на честотното отместване на метър 1400 в различни моменти от времето $t_i = (\Delta t + t_{rel}) \cdot i$

d_{1500} , d_{1600} съответно ще носят информация за звуковото налягане, упражнено върху влакното на съответната точка по неговата дължина. Т.е. имаме възможност да получим разпределено и на практика едновременно прослушване (ако извлечем информация за демодулация на акустичната вълна в звуковия обхват) на всяка точка от дължината на оптичната линия. В случая, все едно че на всеки метър имаме поставен микрофон, и сигналите от тези 3000 микрофона сигналите от които се получават в една точка.

Тук се появява въпросът, могат ли всички, или какво количество от тези сигнали могат да бъдат обработени едновременно в реално време и за какво може да бъде използвана тази информация.



Фиг. 18 Криви на звуковата вълна за $d_{1300}(t)$, $d_{1400}(t)$, $d_{1500}(t)$ и $d_{1600}(t)$

Въпросът за това може ли да бъде обработено толкова голямо количество информация и по какъв начин можем да получим демодулиран акустичен сигнал с форма максимално близка до оригиналната е предмет на други две статии – „Сравнителен анализ на изпълнението на задачата за изглаждане на данни от OTDR в реално време върху паралелна топология на Virtual Random Access Mashine” и „Изглаждане на дискретни данни в реално време при снемане на сигнал от OTDR върху паралелна конфигурация с топология n-мерен хиперкуб”.

Литература:

1. United states Patent N: 4702533, oct., 27, 1987.
2. United states Patent N: 5054935, oct. 08, 1991.
3. United states Patent N: 4068191 jan.. 10, 1978.
4. United states Patent N: 7719666, may, 18,2010.
5. United states Patent N: 4702533, oct. 27, 1987.
6. Pub. No.: WO/2009/005256 International Application No.: PCT/KR2008/003724, Publication Date:08.01.2009
7. A. Toshkov, “Fiber optic distributed sensing system for increasing metropolitan railway safety”, Sofia, Siela 2009
8. А. Тошков, „Принцип на разпределено измерване на физични величини”, Бургас, Научна конференция „Икономика на знанието-възможни предимства и предизвикателства пред висшето образование”, 2008 г.
9. А. Тошков, „Подобряване на точността при разпределено измерване на температура”, Бургас, Научна конференция „Икономика на знанието-възможни предимства и предизвикателства пред висшето образование”, 2008 г.
10. Spontaneous raman power and brillouin frequency shift method based distributed temperature and strain detection in power cables, Abdurrahman Gunday, Gunes Yilmaz, Sait Eser Karlik, http://www.emo.org.tr/ekler/a909674b845c826_ek.pdf