

ЛАЗЕРНАТА ДЕТЕКЦИЯ НА МНОГО МАЛКИ ПЕРИОДИЧНИ ПРЕМЕСТВАНИЯ – НОВИЯТ ПЪТ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВСЕЛЕНАТА.

Юлиян И. Буров

*Софийски Университет “Св. Климент Охридски”, Физически Факултет,
Катедра Физика на Твърдото и Микроелектроника,
Бул. Джеймс Баучер №5, София, България*

THE LASER DETECTION OF VERY SMALL PERIODIC DISPLACEMENTS – THE NEW WAY FOR INVESTIGATION OF THE UNIVERSE

Julian I. Burov

*Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics,
Department of Solid State Physics and Microelectronics,
5 James Bouchier blvd., Sofia, Bulgaria*

ABSTRACT

The paper is written for the Scientific Session in memory of Academician Milko Borisov. The Session is organized by the Bulgarian Academy of Science and the Institute of Solid State Physics. In the paper a small part of his scientific ideas and results is described, only related to the laser interferometry for measuring very small periodic displacements in the sound frequency range. This study was performed in common and then continued by myself. In the early beginning only a few people believed that this was a very promising opening for real gravitational wave astronomy and further development of the human knowledge of the Universe.

KEY WORDS

Laser Interferometry, Very small periodic displacements, Gravitational Waves, High Noise and Digital Signal Processing, Computer Simulation.

Увод. С проф. Милко Борисов публикувахме през 1974 г. в списанието Electronics Letters основни резултати по създаването на методика, използваща еднорамеен фазов оптичен мост за измерване на много малки периодични трептения с амплитуди от порядъка на 10^{-12} m. в килохерцовия диапазон [1]. По-късно чрез допълнителна модулация на оптичния сноп разширихме измерителните възможности на гореспоменатия метод до няколко десетки MHz [2]. Това бе свързано главно с необходимостта основаната и дълго време ръководена от академик Борисов Лаборатория по акусто-електроника и акусто-оптика към Физическия факултет на Софийския Университет да притежава прецизен дистанционен и нерезонансен метод за измерване на различни видове акустични вълни и трептения в твърдите тела в тяхния широк динамичен диапазон от амплитуди и честоти.

За пръв път от нас в гореспоменатата работа [1] по измерване на много малки периодични премествания бяха обявени и потенциалните възможности за използване на лазерната интерферометрия за детекция на гравитационни вълни (ГВ). По-късно в работата [3] с лазерен многолъчев интерферометър от вида на Фабри-Перо бяха измерени от нас трептения от порядъка на $3 \cdot 10^{-19}$ m. Измерителният метод, описан в работи [1, 2, 3] беше използван в редица наши изследвания [4, 5, 6, 7]. Интересът на М. Борисов тогава към детекцията на ГВ беше предизвикан от пионерските работи на Д. Вебер [8], които през средата на шестдесетте години обяви,

че започва създаването на детектор за ГВ. В основата му това бяха твърди метални цилиндри, които биха се разтрептяли от преминаващите ГВ, причиняващи периодично променяща се пространствено-временна метрика. Малките трептения на цилиндрите се регистрираха с пиезоелектрични сензори. Резонансният характер на подобна измерителна схема обаче драстично намалява броя на регистрируемите естествените източници на ГВ във Вселената

Независимо от трудностите, за които ще стане дума по-долу физическата общност изцяло възприе идеята за детекция на ГВ не заради прякото доказателство на Общата теория на относителността на Айнщайн, колкото заради възможността за създаване на Гравитационно Вълнова Астрономия и на съвършено нова технология за изследване и за развитие на познанието ни за Вселената. До сега на практика нашите знания за нея се основават почти изцяло на информацията от електромагнитните вълни, донасяна при прякото им излъчване от самите астрофизическите явления или обекти или при тяхното взаимодействие с тях.

Академик Борисов никога не загуби интереса си към проблема за детекцията на ГВ. По-късно, като член на 38-то Народно Събрание при нашите срещи той винаги споменаваше, че това е най-възловия проблем на физиката за решаване през новото столетие, и че можем и ние да дадем свой принос в тази насока. Той имаше предвид и опита ни по усилване на акустични вълни в пиезополупроводникови материали, които да се използва за да се увеличи слабия сигнал, получаван от естествените източници на ГВ, новите методи за цифрова обработка на сигналите в присъствие на висок шум, съвременната бърза комуникация и изчисления с разпределени параметри и други.

Като благодаря на организаторите за поканата за участие в юбилейната сесия в чест на академик Милко Борисов реших да изложа онова съвременно състояние в търсенето на ГВ, което е най-близко до идеите и резултатите на академик Борисов и на мен, като негов ученик и последовател.

Гравитационни вълни. Те са предсказани в Общата теория на относителността през 1916 г. от А. Айнщайн, без пряко досега да са детектирани. Източници на ГВ са всички ускорено движещите се маси. J. Taylor и R. Hulse обясняват количествено точно бавното намаление на периода на въртене на двойката неутронни звезди PSR1913 + 16 с непрекъснатото излъчване на ГВ съгласно Общата теория на относителността. За това косвено доказателство на ГВ през 1993 г. те получават Нобелова награда за физика.

Важно отличително качество на ГВ е, че те не се разсейват и поглъщат. Поради това днес се разпространяват и ГВ, които са били генерирани от и след Голямият взрив, наричан още Big Bang, създател на Вселената. Тези ГВ дават своя принос главно за изграждане на така нареченото Стохастично базово поле на ГВ. Съвременните ни познания за Вселената са дали възможност днес с използването на мощни изчислителни технологии да бъдат симулирани астрофизическите явления, пораждащи ГВ. Оказва се, че те излъчват ГВ в звуковия диапазон: от няколко mHz до няколко KHz. В таблица 1 са групирани ГВ, според астрофизическите източници и вида на сигнала, които се поражда от тях във времето.

Таблица 1

<i>Източници на ГВ</i>	<i>Сигнал във времето</i>	<i>Вид на сигнала</i>
1. Пулсари*	Непрекъснат сигнал	Синусов, косинусов или сложна комбинация от тях
2. Supernovae*, GRB*	Единичен импулс със сложна форма	Локомотивен (Burst) сигнал
3. Binary Inspirals*	Единичен импулс със сложна форма	Чуруликащ (Chirp) сигнал
4. Stochastic Background*	Непрекъснат сигнал	Сигнал, обработван с методите на математическа статистика

*Пулсарите са въртящи се неутронни звезди с голяма плътност, които излъчват енергия под формата както на ГВ, така и на електромагнитни вълни от почти целия им спектър: радио, оптичния, X и γ -диапазона.

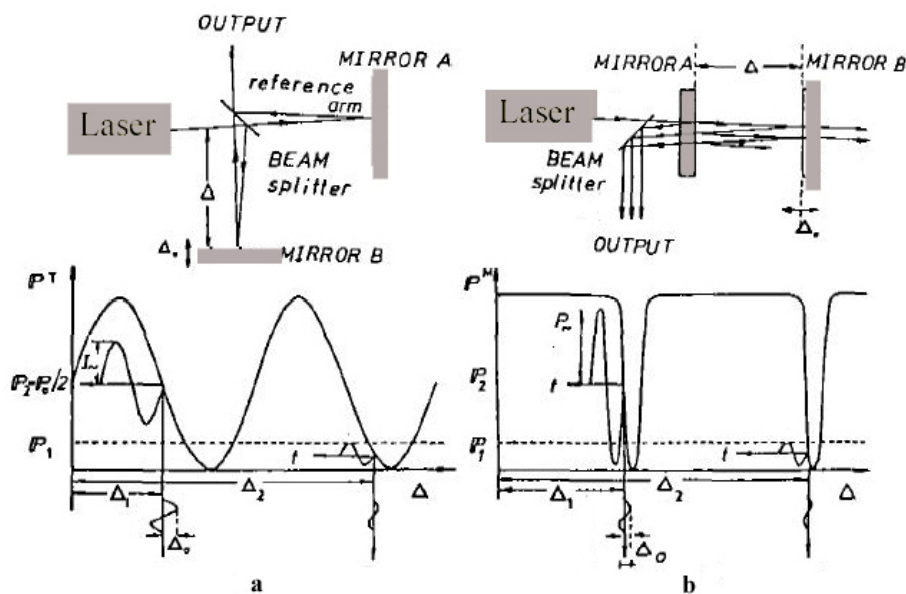
*Супернова (Supernovae - мн. ч. на Supernova) е голямата експлозия и изчезването на масивна звезда, придружено от много силно импулсно излъчване на електромагнитни и гравитационни вълни.

* GRB (Gamma-Ray Burst) Мощно импулсно излъчване на γ -лъчи с продължителност от няколко секунди до минути с формата на Локомотивен сигнал. Предполага се, че това явление излъчва също и мощни ГВ.

* Binary inspirals е мощно импулсно излъчване на електромагнитни и гравитационни вълни във формата на Чуруликаш сигнал, когато две звезди, въртейки се около общ център на масите започват да се сливат, образувайки бяло джудже, неутронна звезда или черна дупка във Вселената.

* Stochastic Background е гравитационното поле в дадена точка, създадено от многобройните разпръснати източници на ГВ във Вселената.

Независимо от голямия обем в които като правило естествените астрофизически източници генерират ГВ, поради голямите разстояния до Земята те излъчват на практика като точкови източници. Поради това огромната енергия на ГВ в точката на генерация, дори когато източника е в нашата Галактика, създава тензор на деформацията на Земята от порядъка на $h = \delta L / L \approx 10^{-21}$. Това означава, че едно разстояние L от порядъка на 1 km на Земята се променя едва с 10^{-18} m, което е приблизително равно на една хилядна от диаметъра на протона. При разположение на детектора на ГВ на Земята, е необходимо да се неутрализира шума на микросейсмичната активност на земната кора от порядъка на 10^{-6} m.Hz^{-1/2}. Трябва да бъдат преодолен и собствените трептения на атомите от огледалата на лазерния интерферометър, на шумовете на електронните и светлинните потоци и други, участващи в измерителната схема за да се измерят гореспоменатите малки стойности на сигнала на ГВ. При лазерни източници с дължини на светлинната вълна от порядъка на 10^{-6} m е необходима оптична схема, която да позволява измерване на дължини 10^{12} пъти по-малки от дължините на лазерната вълна. За пръв път в нашата работа [3], публикувана през 1989 г. е направен обстоен анализ и е показано експериментално, чев това е възможно. На фиг. 1a и 1b са показани съответно две измерителни схеми- на двулъчева (интерферометър на Майкелсон-ИМ) и многолъчева интерферометрия (Фабри-Перо интерферометър-ФПИ). Огледалото В е подвижно и дава възможност за настройка на интерферомет-



Фиг. 1

рите в режим на максимална стръмност $S = \partial P / \partial \Delta$ з фазова разлика $\Delta = \Delta_1$. P и Δ са съответно изходната мощност и фазовата разлика лазерните снопове на интерферометрите. Малките трептения на огледалата В с еднакви амплитуди Δ_0 предизвикват променливи светлинни потоци на изхода на интерферометрите, пропорционални на стръмностите S и S_b , които двете измерителни схеми притежават. Анализът показва, че при равни входни мощности на лазер-

ния сноп P_0 и на мощността P_2 при настройката в режим на максимална стръмност и на двата интерферометъра, отношението между максималните им стръмности е:

$$(1) \quad \frac{S_b}{S_a} = \frac{8\sqrt{R}}{1-R},$$

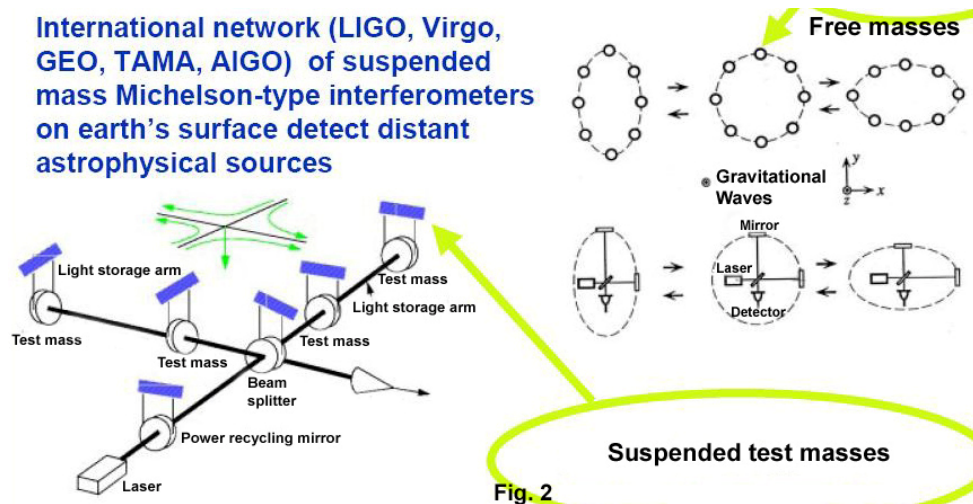
където R е коефициентът на отражение на входното огледало на Фабри-Перо интерферометъра.

Вижда се от (1), че когато $R \approx 1$ стръмността S_b на ФПИ може да стане многократно по-голяма от тази на двулъчевия МИ. С двулъчеви интерферометри от вида на Майкелсон лесно се постигат чувствителности от порядъка на $(10^{-12} \div 10^{-14})$ m. [1, 8, 9] т.е. могат да измерват амплитуди $10^6 \div 10^8$ пъти по-малки от дължината на лазерната вълна. Формула (1) показва, че с добри оптически технологии, позволяващи създаването на огледала с $R \approx 1$ може да се достигне и премине условието за измерване на амплитуди 10^{12} пъти по-малки от лазерната дължина на

вълната, за да се достигне до необходимата чувствителност за измерване на тензора на деформацията на **ГВ**.

Другите естествени ограничители на чувствителността на измерителната схема е същественото участие в нея на потоци от частици – фотони, фонони и електрони, чиито естествени флуктуации от средните им стойности по свой специфичен начин въвеждат шумове, ограничаващи чувствителността. Lock in технология за намаление на дробовия шум на електронния поток беше използвана от нас за да се регистрират електрически трептения на няколко порядъка под нивото на електронния шум. В нашата работа беше показано, че чувствителността зависи от мощността на използваното лазерно лъчение и съществено тя може да се повиши с увеличение на мощността на лазерния сноп. Всичко това създаде увереност, че е възможно като се използва оптична ФПИ схема да се създаде измерителна система за детекция на **ГВ**. Понастоящем 6 международни проекта прилагат изцяло експерименталната схема, описана в нашата работа [3].

Всяко от двете Майкелсонови рамена на интерферометъра, както е показано на фиг. 2 се състоят от многолъчев ФПИ, за да се използва високата му чувствителност. Използува се геометрията на МИ защото тя отговаря изцяло на специфичната поляризация на тензора на деформацията на **ГВ**, които предизвиква едновременно



свиване в едното и разтягане в другото рамо, както е показано на Фиг.2. Периодичното свиване и разтягане с честотата на **ГВ** предизвиква променлив светлинен поток, които се трансформира в променлив електрически сигнал от фотодиод. Оптичните снопове се разпространяват във ултрависок вакуум, за да се изключат лъжливи сигнали от Релеево разсейване и възможни температурни флуктуации в коефициента на пречупване на газа в тръбата. 9000 m³ е обемът ултрависок вакуум за интерферометър с 4 km рамена и е най-големият засега обем в света.

Шестте големи наземни проекта са:

1. В САЩ проектът **LIGO** има два интерферометъра с по 4 km дълги рамена: единият при Hanford, Washington и другият при Livingston, Louisiana, както и още един с дължина на рамената 2 km при Hanford. Последния използва вакумната установка на 4 километровия си двойник,

2. В Италия близо до Pisa проектът **Virgo** има 3 km дълги рамена,

3. В Германия близо до Hanover проектът **GEO** е с 600 m дълги рамена,

4. В Япония близо до Tokyo проектът **TAMA** е с 300 m дълги рамена,

5. В Австралия близо до Perth **AIGO** сега набира скорост.

Още един наречен **LISA** се проектира да бъде разположен скоро изцяло в Космоса близо до Земята с дължина на рамената 100 km. Предвижда се проектите да бъдат свързани със съвременна комуникация за да се използва от една страна схемата за съвпадение, за да се анулират локалните сеизмични импулси и за да се извърши определянето на източника на **ГВ** във Вселената. Предвижда се подобна връзка да има и с Центровете на Земята и в Космоса за детекция на високо-енергийно лъчение с космически произход, доколкото генерацията на **ГВ** е винаги съпроводена и с генерация на X и γ -лъчи, на потоци от неутрино и други. На **Фиг. 3** е показана панорамна снимка на LIGO при Hanford, Washington, а на **Фиг. 4** измерените чувствителности **h** на тензора на деформацията на интерферометъра при Livingston, Louisiana през различни пе-

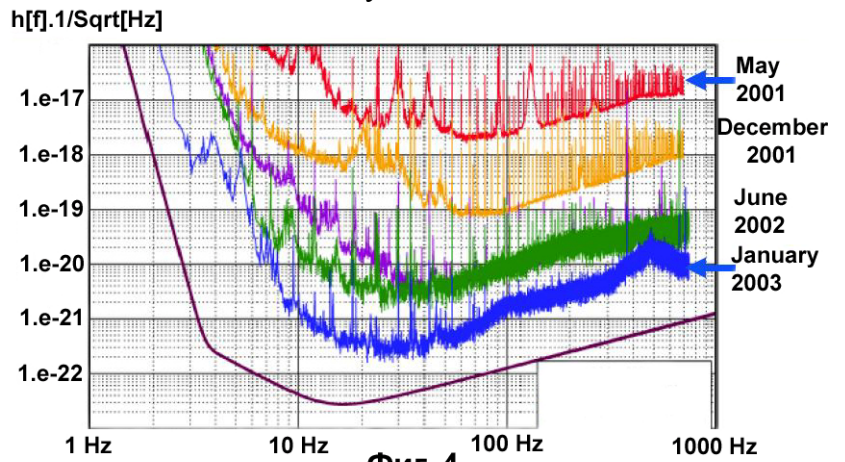
Hanford Observatory



Fig. 3

риоди от време. В резултат на подобренията в измерителната схема и апаратурата с времето чувствителността постепенно се е подобрявала към теоритично пресметнатата, показана с най-долната крива на фигурата. Статистическите изследвания [10] за генерацията на **ГВ** от импулсни източници показва, че вероятността за такова събитие в обем, равен на нашата Галактика е 10^{-6} за година. При съотношение сигнал/шум - $S/N \cong 10$ чувствителността на TAMA проекта позволява да се регистрират такива събития в обем около

земята с радиус от порядъка на 1 Mps (Мегапарсека). $1 \text{ Mps} = 30.657 \cdot 10^{12} \text{ km}$. LIGO и VIRGO проектите при същото съотношение на $S/N = 10$ могат да регистрират събития в обем от порядъка на 20 Mps, което съответствува на VIRGO-кластерът. Последният е съставен от около 4000 галактики като нашата, което означава, че средния период на генерацията от импулсни източници на **ГВ** е от порядъка на 250 години. Едно повишение на чувствителността само 10 пъти понижава средният интервал на регистрируемите импулсни генерации от 250 години до 3 месеца, тъй като обема на пространството от което могат да се регистрират импулсните генерации на **ГВ** нараства право пропорционално на чувствителността. При изграждането на изброените проекти се използват най-съвременните електронни, оптични, лазерни, механични и вакуумни технологии, известни в науката и индустрията за постигането на максималната чувствителност [11].



Фиг. 4

Единственият останал резерв за повишение на чувствителността е в създаването на нови алгоритми за цифрова обработка на данните от измерванията, които да позволи “откриването” на много слаби некооперативни сигнали в присъствието на висок “оцветен” шум.

Алгоритъм на фазовото търсене. В нашите работи [1, 2, 3] сигналът от външен генератор беше използван както за да извлече чрез Lock in технологията подобен на него от общата смес на шум и слаб сигнал, така и за да разтрепти едното от огледалата на ФПИ.

ГВ сигналите обаче имат свършено други параметри:

1. **ГВ** сигналът е потопен във висок “оцветен” шум,
2. Когато произхожда от непериодични източници **ГВ** сигналът е високо некооперативен: гой може да се появи по всяко време, формата и продължителността му по принцип са неочаквани, макар че симулацията на работата на потенциалните източници на **ГВ** дава предварителна информация. Понастоящем съществува голяма активност по симулацията на работата на астрофизическите източници и вида на **ГВ** сигналите, които те биха излъчили.

3. ГВ сигналът е средно статистическо не често случващо се събитие, без възможност за предсказване и повторение, самите шумови компоненти могат понякога да носят характера на гравитационния сигнал,

4. Периодичният ГВ сигнал се очаква да е много по-слаб от импулсните ГВ сигнали,

5. ГВ сигналите са резултат от непрекъснато протичащ за определено време физически процес, поради което Фуриеровите му компоненти са кохерентни сигнали, т.е. такива с постоянна или бавно променяща се с времето фаза.

Така че общият сигнал $X(t)$ може да се представи най-общо с формулата:

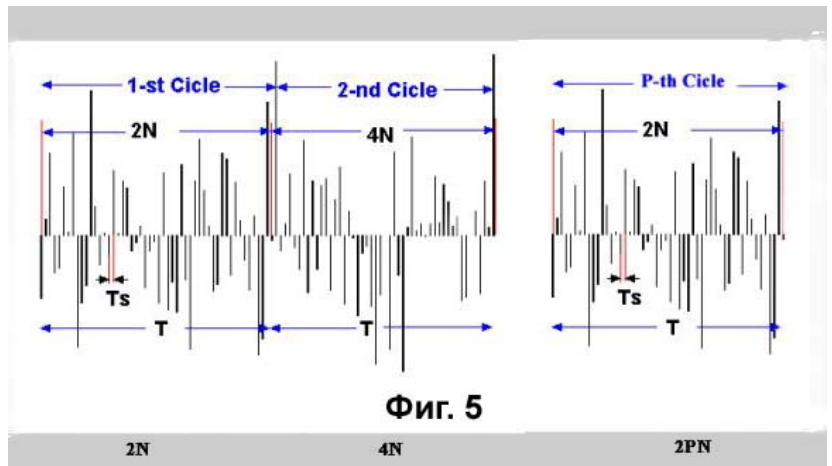
$$(2) \quad X(t) = \sum_{i=1}^q A_i \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i) + B \cdot \text{randn}(\text{size}(t))$$

където с A_i , $\omega_i = 2\pi f_i$ и φ_i са означени съответно i – тата амплитуди, кръгови честоти и фази на q на брой Фуриерови компоненти на търсения ГВ сигнал, а с $B \cdot \text{randn}(\text{size}(t))$ шумовата компонента в общия сигнал. Формула (2) е написана с Фуриерови компоненти за да представи по общият математически запис, включващ в себе си възможните сложни сигнали, като единични импулси, сигнали от вида на локомотивния, чуруликация и други. За да се приложи цифрова обработка на общия сигнал (2), последния се оцифрява, като се нахвърля във времето с кръгова честота $\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi}{T_s}$ така, че в точките $t = n/f_s = n \cdot T_s$ той получава стойностите:

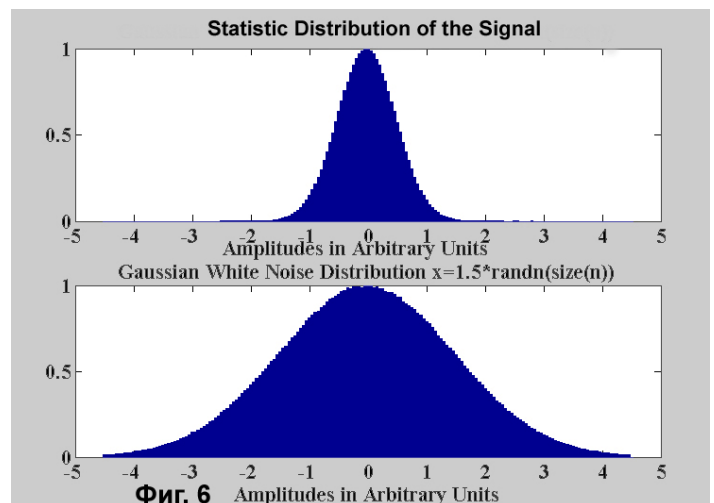
$$(2') \quad X(n \cdot T_s) = X_n = \sum_{i=1}^q A_i \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{T_s}{T_i} + \varphi_i) + B \cdot \text{randn}(\text{size}(n \cdot T_s))$$

където $n = 1, 2, 3, \dots$ е цяло положително число. Единственото условие при оцифряването т.е. при преходът от непрекъснат във времето към цифров сигнал (поредица от числа) и обратно е да бъде спазена теоремата на Нейквист, т.е. неравенството $T_s < 1/2f_a$, където $2\pi f_a = \omega_a$ е най-високата кръгова честота от съвкупността ω_i на кръговите Фуриерови честоти на сигнала (2). На практика всички гореспоменати проекти записват сигналите от фотодиода в цифровия вид (2') като база от данни, която може да бъде достъпна за обработка по всяко време, включително и по Internet мрежата. Като пример на Фиг. 5 е показан цифров сигнал, съставен от синусов сигнал с честотата $f = 1/T$, честота на дискретизация $f_s = 1/T_s$ ($T/T_s = 2N$) и един "бял" Гаусов шум.

На Фиг. 6 е показано статистическото разпределение на амплитудите на различни сигнали. На Фиг. 6 горната фигура показва статистическото разпределение на общ сигнал съгласно формула (6) в които синусовия член е с амплитуда 0.005, а шумовия – с 0.5 произволни единици, а долната – бял "Гаусов" шум, с амплитуда 1.5 произволни единици, генериран от шумов генератор в среда на MathLab. Вижда се и от двете криви, че най-вероятната стойност на



Фиг. 5



Фиг. 6

амплитудата на “бялия” Гаусов шум е равна на нула и че амплитудите с положителни и отрицателни стойности са нормално разпределени. Бялият шум е най-често срещания шум в природата. Понастоящем цифровите генератори на шум могат да симулират всякакъв вид “цветен” шум.

И двата сигнала от **Фиг. 5** – синусовият и Гаусовият шум са с еднакви амплитуди и с обща продължителност **P.T**. Цялото положително число **P** се определя от броя на периодите **T**, които се нанасят в разглежданата обща дължина на сигнала, а **n = 1, 2, 3,..(2N)**. На **Фиг. 5** всяка **n**-та стойност **X_n(nT_s)** на общия сигнал е изобразена като вертикална отсечка съгласно формулата:

$$(3) \quad X_n(nT_s) = A.\sin(2\pi nT_s/T) + A.\text{randn}(\text{size}(nT_s)).$$

Ако към всяка стойност **X_n(nT_s)** от първия период **T** на общия сигнал прибавим съответните им стойности от останалите **P** периода получаваме:

$$X_m^{\text{sum}} = X_m\left(\frac{T_s}{T}m\right) + X_m\left(\left(\frac{T_s}{T}m + 2N\right)\right) + X_m\left(\frac{T_s}{T}m + 2(2N)\right) + X_m\left(\frac{T_s}{T}m + 3(2N)\right) + \dots X_m\left(\frac{T_s}{T}m + P(2N)\right) =$$

$$(3') \quad A \sum_{k=1}^P \sin\left(2\pi\left(\frac{f}{f_s}m + k\right)\right) + A \sum_{k=1}^P \text{randn}(\text{size}((n+k)T_s)) =$$

$$(3'') \quad A.P.\sin\left(2\pi\left(\frac{f}{f_s}m\right)\right) + A \sum_{k=1}^P \text{randn}(\text{size}((n+k)T_s)),$$

където $1 \leq m \leq 2N$. Както се вижда от първия член на формула (3'') при кохерентното сумиране на компонентите на сигнала с една и съща фаза амплитудата на синусовия сигнал нараства **P** пъти, докато шумовата компонента поради некохерентното сумиране се очаква да нараства много по-бавно. Условието за кохерентно сумиране на хармоничен сигнал с честота **f** при

честотно сканиране с честота **F**, изисква: $\sin\left\{2\pi\left[\frac{f}{f_s}m + (k+1)\frac{f}{F}\right]\right\} = \sin\left[2\pi\left(\frac{f}{f_s}m + k\frac{f}{F}\right)\right]$.

Горното условие се реализира за сканираща честота **F**, свързана с **f**, съгласно равенството:

$$(4) \quad \frac{f}{F} = s,$$

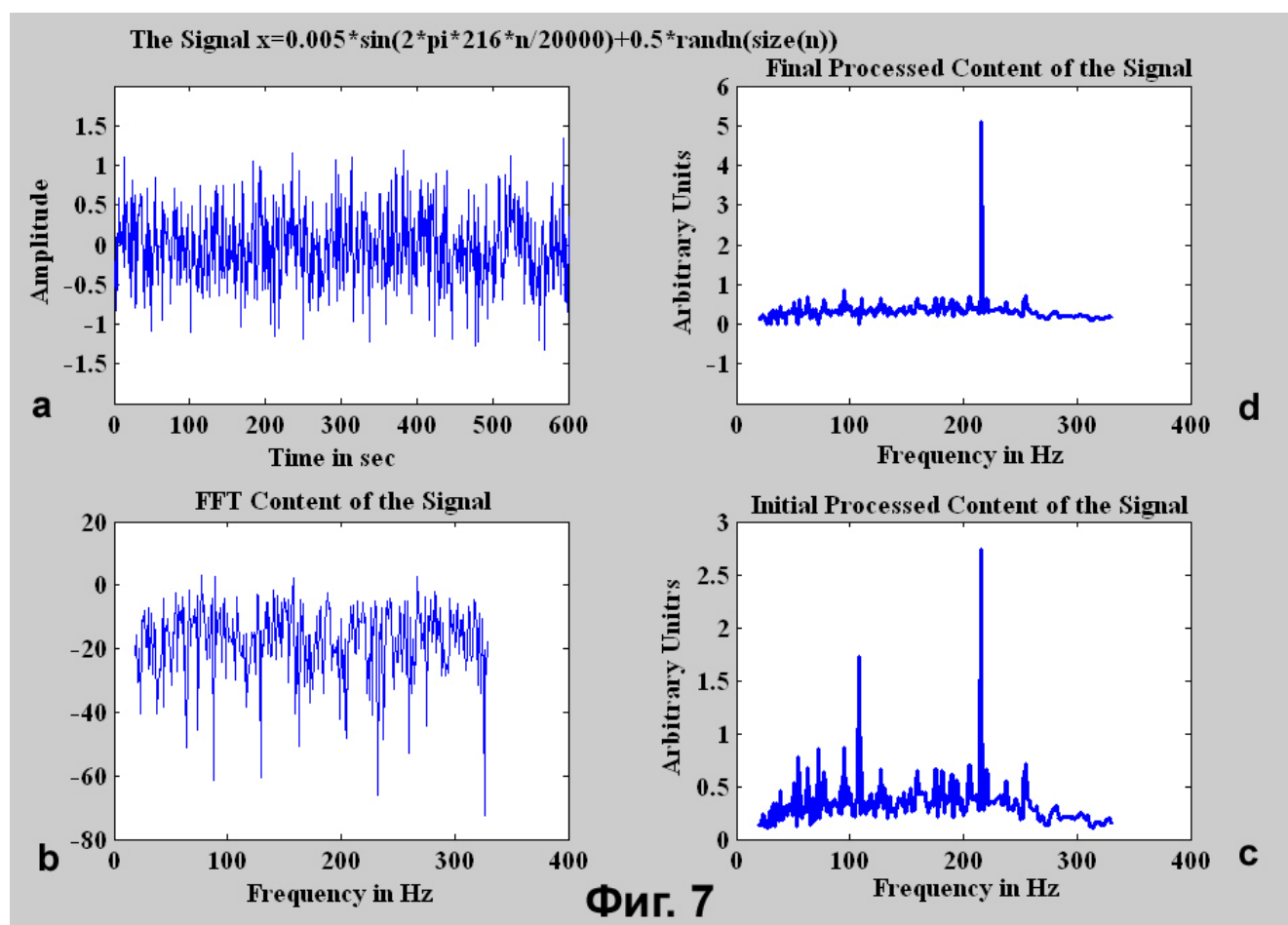
където **s=1, 2, 3,...** е цяло положително число. Когато търсиме в общ сигнал разпределението на мощността на сигнала по честоти стандартната процедура е да се приложи Дискретна Фуриерова Трансформация (ДФТ). Анализът при прилагането на ДФТ към (3'') показва, че шумовата компонента клони към своята най-вероятна стойност, т.е. при “бял” Гаусов шум към нула. Това са основните елементи, които са в основата на разработения от нас алгоритъм за определяне на много слаби сигнали на фона на силен шум.

Алгоритъмът на **Фазовото търсене** позволява всяка база от данни от вида (2'), включително и в реално време да бъде обработена и да се “изровят” от нея сигналите с постоянна фаза, дори и когато амплитуда им е много пъти по-малка от тази на шума. На **Фиг. 7** са показани резултатите от прилагането на разработена от нас програма в среда на MathLab за **Фазово търсене** по разгледания алгоритъм за сигнал, респективно за база от данни, изградена по формулата:

$$(5) \quad X=0.005*\sin(2*\pi*216*n/21600) + 0.5*\text{randn}(\text{size}(n)).|$$

В нея първият член представлява синусово трептене с честота **f=216 Hz** и амплитуда **A=0.005** единици, смесен с бял Гаусов шум (вторият член) с амплитуда **0.5** единици (девиация $\sigma = 0.5$) и средна стойност нула. Честотата на дискретизация е **f_s=21600 Hz**. На **фиг.7а, 7b, 7с и 7d** са показани съответно вида на самият сигнал (5), Фуриеровото му честотно съдържание, етап от междинна обработка и крайният резултат. Виждат се на **фиг.7с** трептения с честоти **108Hz, 72Hz, 54Hz, 36Hz** и т.н. предвидени съгласно условието (4). На **фиг. 7d** е показан след крайната обработка ясно изразен сигнал на **216 Hz**, превишаващ повече от **6** пъти околните сигнали. Това

съответствува на съотношение $\frac{S}{N} \cong 0.0017$. Международни проекти работят при $\frac{S}{N} \cong 10$.



Това означава, че с нови алгоритми и цифрова обработка чувствителността на ГВ детекторите може да се подобри значително – от порядъка на 6000 пъти и съответно обема откъдето могат да се детектират ГВ да нарастне $(6000)^3$ пъти.

Литература:

1. M. I. Borissov and J. I. Burov, "One-arm Phase Optical Bridge with Axial Symmetry [with Interference Newton Frenes] for Measuring Small Periodic Displacements", *Electron. Letters*, 9, pp.355-357, 1973,
2. M. Borissov, Kl. Brunsalov and J. Burov, "One-arm Phase Optical Bridge for Measuring Small Amplitude High Frequency Vibrations" *Jap. J. Appl. Physics*, 15, pp.797-801, 1976,
3. J. Burov and D. V. Ivanov, "Multibeam Interferometric Methods for Measuring Very Small Periodic Displacements", *Applied Optics*, 28, pp.3343-3350, 1989,
4. L. Konstantinov, V. Hinkov, J. Burov and M. Borissov, "An Acoustic Approach to the Optical Spectroscopy in Solids", *Nuovo Cimento*, B 39, pp. 550-555, 1977,
5. L. Konstantinov, V. Hinkov and J. Burov, "Changes of the Surface Energy of Solids Caused by Light Absorption", *J. Phys.*, C-14, pp.1779-1807, 1981,
6. M. Borissov, V. Hinkov, J. Burov, V. Strashilov and K. Bransalov, "Resonant Gate Transistor with Active Vibrator (RGTA V)", *Inter. J. Electronics*, 39, p.337-342, 1975
7. L. Konstantinov, V. Hinkov, M. Borisov and J. Burov, "Photosensitivity of the Elastic Properties" of CdSe", *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 44, pp.743-747, 1978
8. J. Weber, "Gravitational waves", *Phys. Today*, 21, pp.34-39, 1968,
9. D. Royer and E. Dieulesant, "Optical Detection of Sub-Angstrom Transient Mechanical Displacements", *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Williamsburg, pp.218-223, 1986,
10. E. S. Phinney, "The rate of Neutron Star Binary Merges in the Univers: Minimal Predictions for Gravity Wave Detectors", *Astrophysical J.* 380, pp.17-24 (1991),
11. B. C. Barish and R. Weiss, "Ligo and the Detection of Gravitational Waves", *Physics Today*, October 1999