

А.Ж.Омар , З.Ж.Жанабаев , А.А.Серикбаев 
ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
Алматы, 050040, Қазақстан
*E-mail: omaruzhan@gmail.com

GW170104 ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ТОЛҚЫН СИГНАЛЫН МЕТРИКАЛЫҚ САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Ұсынылған жұмыста LIGO Hanford пен Livingston детекторларынан алынған GW170104 күрделі сигналға информация энтропиялық талдау жүргізілді. Сондай-ақ жаңа әдіс [1], $K_{x,t}^{p,q} = \frac{((|x|^p))^{1/p}((|t|^q))^{1/q}}{|(x,t)|}$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ функциясы қолданылды. Таза метрикалық сипаттама $K_{x,t}^{p,q}$ және топологиялық өлшем – информациялық энтропияның байланысы арқылы динамикалық хаостың өзұқсас пен өзәффинді критерилерін сандық сипаттауға болады. Біз ұсынған хаосты процестер мен объектілердің топологиялық өлшемінің классификациясы физикалық тәжірибелермен, Күннің радиосәулеленуінің мәліметтері мен ғарыштық қозуларда, Жер айналысында расталады. Мақалада қолданылған әдіс бифрукацияның пайда болуын анық көрсетеді. Осы әдіспен гравитациялық толқынның бес мысалын зерттедік. Барлық сигналдарға сандық талдау жүргізілді.

Қазіргі таңда гравитациялық толқындарды зерттеу мен оларды дәл тіркеу өте өзекті мәселе, себебі ол Әлемнің өткені мен болашағын білуге апарар негізгі жол болып табылады. Осы жұмыста GW170104 гравитациялық толқынын MatLab қолданбалы бағдарламалар ортасында өңдеп, сигналдың $K_{x,t}^{p,q}$ –эволюциялық параметрін анықтадық, ол шуыл арасынан гравитациялық толқынды айқындап берді. Тіркелген гравитациялық толқындарды қарапайым компьютерлік модельдеу әдісі арқылы күрделі сигнал ішінен гравитациялық толқынның қай уақыт мезетінде болатындығы анықталынды. Шуыл аз болғанда ғана гравитациялық толқын көрінетіні дәлелденді.

Түйін сөздер: гравитациялық толқын, энтропия, эволюциялық параметр, информация, бифрукация.

А.Ж.Омар , З.Ж.Жанабаев , А.А.Серикбаев 
Казахский национальный университет имени аль-Фараби
Алматы, 050040, Казахстан
*E-mail: omaruzhan@gmail.com

МЕТРИКО-КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОГО СИГНАЛА GW170104

Аннотация. В настоящей работе был проведен энтропийный анализ комплексного сигнала GW170104 от детекторов LIGO Hanford и Livingston. Также был использован новый метод $K_{x,t}^{p,q} = \frac{((|x|^p))^{1/p}((|t|^q))^{1/q}}{|(x,t)|}$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ функции. Через взаимосвязь чисто метрической характеристики $K_{x,t}^{p,q}$ и метрико-топологической характеристики – информационно-энтропийных критериев самоподобия и самоаффинности можно количественно описать закономерности динамического хаоса. Предлагаемая нами метрико-топологическая классификация хаотических процессов и объектов подтверждается физическим экспериментом и анализом данных по радиоизлучению Солнца космических возмущений, колебаний Земли. Метод, использованный в статье, ясно иллюстрирует появление бифуркации. Мы исследовали пять примеров гравитационных волн этим методом. Все сигналы были количественно проанализированы.

В настоящее время исследование гравитационных волн и точная регистрация являются чрезвычайно важной темой, поскольку это основной способ описание прошлого и

будущего Вселенной. В этой статье мы обработали гравитационную волну GW170104 в прикладной среде MatLab и определили $K_{x,t}^{p,q}$ – эволюционный параметр сигнала, который обнаружил гравитационную волну между шумами. Методом простого компьютерного моделирования было определено, в какой момент гравитационная волна исходит из сложного сигнала. Было доказано, что гравитационная волна видна только тогда, когда шум небольшой.

Ключевые слова: гравитационная волна, энтропия, эволюционный параметр, информация, бифуркация.

A.Zh. Omar , Z.Zh.Zhanabaev , A.A. Serikbayev 
Al-Farabi Kazakh National University
Almaty, 050040, Kazakhstan
* Email: omaruzhan@gmail.com

METRIC-QUANTITATIVE RESEARCH OF GRAVITATIONAL WAVE SIGNAL GW170104

Abstract. In this work, we performed the entropy analysis of the complex signal GW170104 from the LIGO Hanford and Livingston detectors. A new function method $K_{x,t}^{p,q} = \frac{(|x|^p)^{1/p} (|t|^q)^{1/q}}{|(x,t)|}$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ was also used. Through the interconnection of a purely metric characteristic and a metric-topological characteristic — information-entropy criteria of self-similarity and self-affinity, the laws of dynamic chaos can be quantitatively described. Our proposed metric-topological classification of chaotic processes and objects is confirmed by a physical experiment and analysis of data on the radio emission of the Sun from cosmic disturbances, Earth oscillations. The method used in the article clearly illustrates the appearance of bifurcation. We investigated five examples of gravitational waves with this method. All signals were quantified.

At present, the study of gravitational waves and accurate registration are an extremely important topic, since this is the main way to discover the past and future of the Universe. In this article, we processed the GW170104 gravitational wave in the MatLab application environment and determined the evolutionary parameter $K_{x,t}^{p,q}$ of the signal that detected the gravitational wave between noises. Using simple computer simulation, it was determined at what point the gravitational wave comes from a complex signal. It has been proven that a gravitational wave is visible only when the noise is small.

Key words: gravitational wave, entropy, evolution parameter, information, bifurcation.

Кіріспе

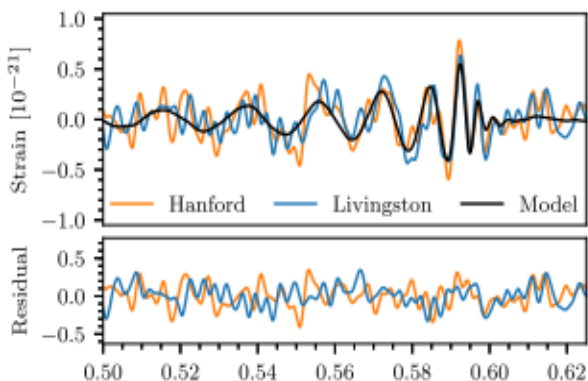
2017 жылдың 4 қаңтарында өте жоғары статистикалық дәлдікпен гравитациялық толқын сигналы тіркелді. 1-суретте LIGO Hanford пен Livingston детекторларынан алынған жиілік-уақыт мәліметтері көрсетілген. GW170104 сигналы тұтас бинарлы сигнал ретінде сипатталады. GW170104 сигналы Ливингстонға дейін Хэнфордқа ~ 3 мс уақытта келіп жеткен және ол жұлдыздық массасы 3×10^9 жарық жылы қашықтығындағы екі қара дене бірігуінен пайда болды.

GW170104 көзі ретінде субполярлы металды ортада түзілетін, жалпы массасы $\sim 50 M_{\odot}$ ауыр қос қара дене болып

табылады[2]. Қара дене айналысын өлшей келе, орбиталды бұрыштық моменті түзуленгені байқалады. Болжанған жылдамдығы алдыңғы есептеулерге сәйкес[3,4], окшауланған қос қара денелер эволюциясы нәтижесінде немесе тығыз жұлдыз шоғырының динамикалық әсерлесуінен түзілген.

Қосарланған қара денелерді гравитация-толқындық бақылау, жалпы салыстырмалы теориямен (ЖСТ) тексеруге идеалды құрал және оның баламасы болып табылады. Олар жылдамдық релятивті, кеңістік-уақыт динамикалық болып келетін тартылыстың күшті өрісінің режимдері туралы түсінік бере алады. Бірінші

бақылауларда табылған көздермен орындалған сынамадарда ЖСТ болжамынан[3,6] ауытқуы туралы ешбір дәлел болмады. GW170104 осы шектеулерді күшейтуге мүмкіндік береді. 1-суретте көрінетіндей, гравитациялық толқын келіп жету уақыты 0.12с.



1 – сурет. Хэнфорд пен Ливингстон детекторларынан алынған жиілік-уақыт тәуелділігі[5]

Гравитациялық толқындарды зерттеудегі негізі мәселе – тіркеген сигналдағы шуылдың толқынның нақты қай мезетте болатындығын көрсетуге кедергі болуы. Мақала бізге келіп жеткен сигналдан гравитациялық толқынды шуылдан айырып, таза гравитациялық толқын болатын уақытын анықтауға болатын, қазіргі кезде өзекті болып отырған мәселені, жаңа әдіс $K_{x,t}^{p,q}$ функциясын[1] қолдандық. MatLab қолданбалы бағдарлама аясында сандық зерттеу жүргіздік.

Бақылаулар мен мәліметтер дерекқорының мұрағаты

LIGO детекторлары Хэнфорд пен Ливингстон[7,8] обсерваторияларындағы қос-өңдеуші екі Фабри-Перо Майкельсон интерферометрлерін қолданып гравитация-толқынды деформацияны өлшейді. Бірінші бақылаулардан кейін LIGO детекторлары аспаптық шуылды азайту мен мәліметтер сапасын арттыруға арналған коэффициенттері эксплуатацияға енуден өтті. Hanford детекторы үшін қуатты лазерлік баспалдағы енгізілген және бірінші кадам ретінде, жоғарғы жиіліктегі бытыралық шуылды азайту үшін, лазер қуаты 22Вт-тан 30 Вт-қа дейін арттырды[8].

Ливингстон детекторы үшін лазер қуаты өзгертілмеді, бірақ шашыраңқы жарық шуылының азаюы әсерінен төменгіжиілікті сипаттамалар айтарлықтай жақсартылды.

Зерттеу әдісі

Бұл жұмыста, GW170104 гравитациялық толқыны мәліметтерін[9] MatLab қолданбалы бағдарламалар ортасында өңдеп, сигналдың $K_{x,t}^{p,q}$ – эволюциялық параметрін анықтау, шуыл арасынан гравитациялық толқынды айқындап беруге мүмкіндік береді. $K_{x,t}^{p,q}$ функциясы төмендегі өрнекпен есептелінді:

$$K_{x,t}^{p,q} = \frac{(|x|^p)^{1/p} (|t|^q)^{1/q}}{|(x,t)|}, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1(1)$$

Екі кез-келген функцияға арналған оң жақ бөліктегі біртексіздік өлшеміннің минималды мәнін аламыз.(1)өрнекті жалпы-метрикалық сипаттама деп атаймыз[1, 10].

Физикалық қосымшаларда $\langle x(t) \rangle$ уақыт бойынша орташалауды қолдануға болады. $p = q = 2$ жағдайы қарастырылды, сипаттама эвклидті метрикамен анықталды. Фракталдық метрика үшін $\bar{p} = D$ пайдаланамыз, мұндағы $D = d + \gamma$ - фракталдық өлшемділік, $d = 2$ – топологиялық өлшемділік.

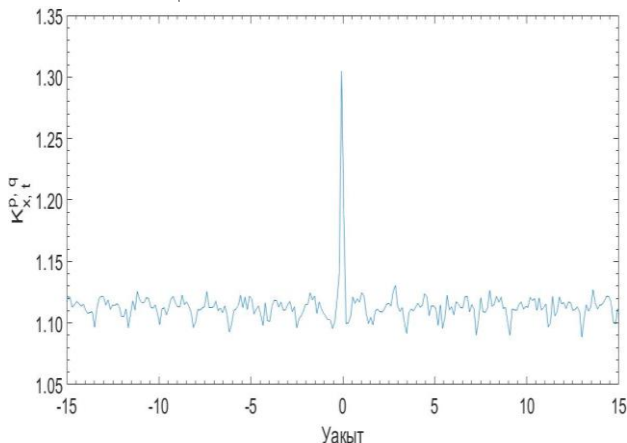
Нәтижелер

Хэнфорд детекторынан алынған мәліметтерден $n=500$ деп алып, $\Delta t = 0,122$ с болғанда 2-суретте амплитудасы 1,3-ке тең болатын шыңды көреміз.

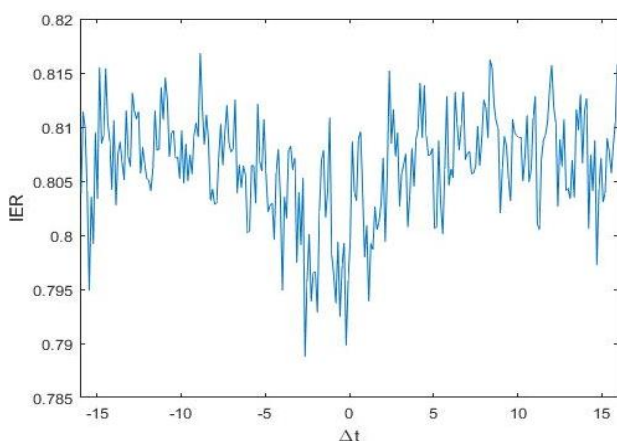
Бұл шың дәл осы уақыт аралығында гравитациялық толқынның бар екендігін көрсетеді. Бұл мән теориядағы гравитациялық толқынның уақытымен сәйкес келеді[6]. Мақаладағы экспериментте алынған $t = 0,12$ с мәнімен де шамалас. 3-суретте 0,122с маңайында информациялық энтропияның[10] минимумдық ойысын байқаймыз. $K_{x,t}^{p,q}$ функциясы реттіліктің параметрі болса, ал информациялық энтропия бейберекет пен хаостың бар екендігін көрсетеді.

Ливингстон детекторынан алынған мәліметтерді 4-5суреттерден көре аламыз. Бұл суреттерден де $\Delta t = 0.122$ с

уақытында, $K_{x,t}^{p,q}$ функциясын анықтаған кезде максимум шың мен информациялық энтропияны анықтау кезінде минимум ойысты байқаймыз.



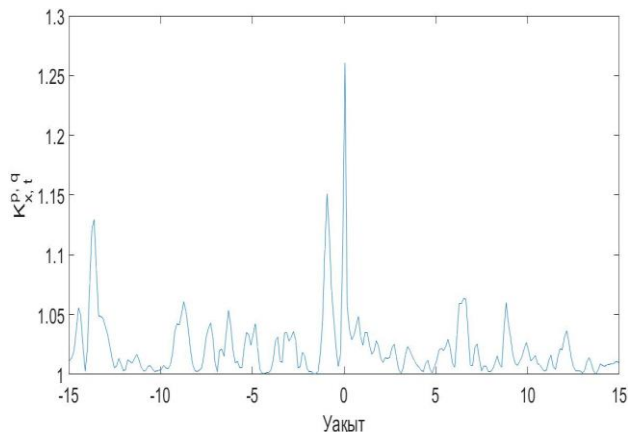
2 – сурет. Хэнфорд детекторынан алынған GW170104 гравитациялық толқынының $\Delta t = 0.122$ с аралығындағы $K_{x,t}^{p,q}$ параметрінің уақытқа (с) тәуелділігі



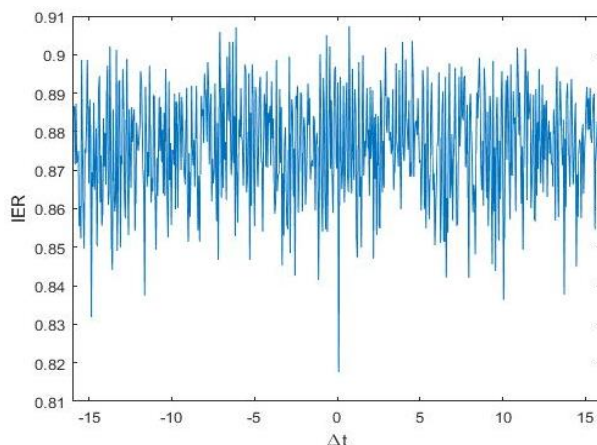
3 – сурет. Хэнфорд детекторынан алынған GW170104 гравитациялық толқынының $\Delta t = 0.122$ с аралығындағы информациялық энтропияның уақытқа (с) тәуелділігі

Қосымша төрт гравитациялық толқындар (GW150914, GW151012, GW151226, GW170608) талданды. Нәтижесінде GW150914 үшін ғана осы әдіс бірігу сигналын көрсетті. Оның себебі, GW170104, GW150914 толқындары сигналының дисперсиясы (орташа ауытқуы σ) салыстырмалы аз болды: $\sigma_{GW170104} = 2,95 \times 10^{-19}$, $\sigma_{GW150914} = 2,3361 \times 10^{-19}$.

Ал қалғандары үшін: $\sigma_{GW151012} = 6.1655 \times 10^{-19}$, $\sigma_{GW151226} = 7.6066 \times 10^{-19}$, $\sigma_{GW170608} = 7.2393 \times 10^{-19}$. Бұл сигналдардың шуылы шамамен 2 есе көптігін көрсетеді.



4-сурет. Ливингстон детекторынан алынған GW170104 гравитациялық толқынының $\Delta t = 0.122$ с аралығындағы $K_{x,t}^{p,q}$ параметрінің уақытқа (с) тәуелділігі



5-сурет. Ливингстон детекторынан алынған GW170104 гравитациялық толқынының $\Delta t = 0.122$ с аралығындағы информациялық энтропияның уақытқа (с) тәуелділігі

Қорытынды

Гравитациялық толқындарды сезімтал детекторларда үздіксіз дәл тіркей алсақ, Үлкен Жарылыстың негізгі көздерін тануға мүмкіндік берер еді. GW170104 гравитациялық толқыннан келген сигналды зерттеу барысында теория мен эксперименттегі уақыт мезеті, шыңның пайда болуымен байланысты, бір-біріне сәйкес келетіндігі шығады. Физикалық

тәжірибелерде де дәлелденген, жаңа әдіс $K_{x,t}^{p,q}$ функциясын берілген күрделі сигнал үшін есептеп, гравитациялық толқынды анықтадық. Толқынның нақты қай уақытта пайда болатындығын қарапайым компьютерлік әдіс арқылы анықтау детекторлар комплексіне балама болып табылады.

GW151012, GW151226, GW170608 толқындарының σ дисперсия мәнін есептеу арқылы, шуыл үшін $\sigma > 3 \times 10^{-19}$ болғанда, бұл әдісті пайдалану үшін күрделі сигналға фильтр қолдану қажет. Шуылы аз болғанда (біздің жағдайымызда GW170104, GW1509146 толқындарының шуыл мәні аз болған жағдайда) $K_{x,t}^{p,q}$ функциясы гравитациялық толқынды күрделі шуылы бар сигналдан анықтаудың қарапайым әдісі болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1 Жанабаев З.Ж. Обобщенная метрическая характеристика динамического хаоса// Матер. VIII межд.школы «Хаотические автоколебания и образования структур». – Саратов, 2007. – С.67-68.
2 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)// *Astrophys. J. Lett*// 2016 - 818, L22.

3 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)// *Phys. Rev.* 2016 - X 6, 041015.
4 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)// *Astrophys. J. Lett.* 2016 - 833, L1
5 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaboration)// *Phys. Rev Lett.* 2018- 118, 221101 – Published 1 June 2017; Erratum *Phys. Rev. Lett.* 121, 129901
6 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)// *Phys. Rev. Lett.* 2016 – 116, 221101.
7 J. Aasi et al. (LIGO Scientific Collaboration) *Classical Quantum Gravity*// 2015 - 32, 074001.
8 В. Р. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)// *Phys. Rev. Lett.* 2016 - 116, 131103.
9 <https://www.gw-openscience.org/events/>
103.Ж. Жанабаев, Самоподобие и самоаффинность хаотических систем// Приложения теории. Мат. VI-й международной научной конференции посвященной 10-летию города Астана «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» 2018 – 11, УДК 530.1.

09.02.2021 басылымға қабылданды