МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Белоненко Алексей Вячеславич

Экспериментальное исследование релятивистских гравитационных эффектов на космических аппаратах с квантовыми стандартами времени и частоты

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный
руководитель:
доктор
физико-математических
наук, профессор
Руденко Валентин Николаевич

Москва – 2025

Îãëàâëåíèå

Ââåäåíèå 4
Îáùàÿ õàðàêòåðèñòèêà ðàáîòû 4
Ýêñïëóàòàöèÿ òåõíè÷åñêîé áàçû ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ 8
Àêòóàëüíîñòü òåìû äèññåðòàöèîííîãî èññëåäîâàíèÿ 9
Öåëè ðàáîòû 11
Îñíîâíûå çàäà÷è 11
Íàó÷íàÿ íîâèçíà 12
Ìåòîäû èññëåäîâàíèÿ 13
Òåîðåòè÷åñêàÿ è ïðàêòè÷åñêàÿ çíà÷èìîñòü 15
Ïîëîæåíèÿ, âûíîñèìûå íà çàùèòó 16
Àïðîáàöèÿ ðåçóëüòàòîâ 18
Ñòðóêòóðà è îáçîð äèññåðòàöèè 20
Ãëàâà 1 Èçìåðåíèå ¾RedShift¿ ýôôåêòà ñ ¾online¿ êîìïåíñàöèåé äîìèíèðóþùèõ êèíåìàòè÷åñêèõ ïîìåõ 23
1.1 Êðàòêèé îáçîð ýêñïåðèìåíòîâ ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà 23
1.2 Âîçìîæíûå ìåòîäû ïðîâåðêè ÏÝÝ ñ èñïîëüçîâàíèåì ¾RedShift¿ ýôôåêòà 24
1.3 Ïîäðîáíûé àíàëèç ýêñïåðèìåíòà Gravity Probe A 26
1.4 GREAT 30
1.5 Ïðîâêòèðîâàíèå ãðàâèòàöèîííûõ èçìåðåíèé c ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ 32
1.5.1 Ïàðàìåòðû öåëåâîé îðáèòû 33
1.6 Àïïàðàòíî-òåõíè÷åñêèé êîìïëåêñ ìèññèè ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ â ãðàâèòàöèîííîì ýêñïåðèìåíòå 35
1.7 ×åðåäîâàíèå ðåæèìîâ: óñòðàíåíèå Äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà ÷àñòîòû 1-ãî ïîðÿäêà 42

1.8 Êðàåâûå ýôôåêòû â öåïî÷êå èçìåðèòåëüíûõ èíòåðâàëîâ 46
1.9 Ïðîáëåìû, ñîïóòñòâóþùèå online êîìïåíñàöèè äîïåðîâñêîãî ñäâèãà 1-ãî ïîðÿäêà 47
1.10 Îøèáêà îöåíêè ÷àñòîòû íà èíòåðâàëàõ êîíå÷íé äëèòåëüíîñòè 50
1.11 Êîìïåíñàöèÿ ýôôåêòà Äîïïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ìàëîñòè 52
1.12 Íàçåìíûå ýêñïåðèìåíòû è îöåíêè èõ òî÷íîñòè 55
1.13 Ïîñëåäóþùèå ýêñïåðèìåíòû 55
Ãëàâà 2 Ôèëüòðàöèÿ àòìîñôåðíûõ ïîìåõ è ó÷åò ôëèêêåð-øóìîâ â ýêñïåðèìåíòàëüíûõ äàííûõ 57
2.1 Êîìïåíñàöèÿ òðîïîñôåðíîãî è èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ðàäèî÷àñòîòû 57
2.2 Ìîäåëü òðîïîñôåðíîãî ñäâèãà ÷àñòîòû 77
2.3 Ôëèêêåð-øóì â âîäîðîäíûõ ñòàíäàðòàõ ÷àñòîòû è ìåòîäû åãî ïîäàâëåíèÿ 85
2.4 Àíàëèç ãðàâèòàöèîííûõ âîçäåéñòâèé Ñîëíöà è Ëóíû íà èçìåðåíèå RedShift 88
Ãëàâà 3 Ñèíòåç íàêîïëåííûõ ¾RedShift¿ èçìåðåíèé ñ îöåíêîé ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ ÎÒÎ " 90
3.1 Ïåðâè÷íàÿ îáðàáîòêà çàïèñåé: ñïåêòðàëüíûé àëãîðèòì îöåíêè ÷àñòîòû 90
3.2 Àëãîðèòì äåòåêòèðîâàíèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà. Ìîäåëèðîâàíèå äàííûõ 95
3.3 Îöåíêà ïîãðåøíîñòè äåòåêòèðîâàíèÿ ÷àñòîòû 101
3.4 Îöåíêà òåîðåòè÷åñêîãî ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà 103
3.5 Îöåíêà ñîâîêóïíîãî ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ " íà îñíîâå äàííûõ ñåàíñîâ çà 2017-2019 ãã. 105
3.6 Ðåçóëüòàòû 107
3.7 Îáñóæäåíèå 108
Çàêëþ÷åíèå 110
Áèáëèîãðàôèÿ 112
Ñïèñîê ëèòåðàòóðû 113

Âåäåíèå

Îáùàÿ õàðàêòåðèñòèêà ðàáîòû

Íàñòîÿùåå èññëåäîâàíèå íàïðàâëåíî íà ýêñïåðèìåíòàëüíóþ ïðîâåðêó êëþ-÷åâîãî ïîñòóëàòà ðåëÿòèâèñòñêîé ôèçèêè ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè Ýéí-øòåéíà (ÏÝÝ) [1], ñîñòàâëÿþùåãî êîíöåïòóàëüíóþ îñíîâó îáùåé òåîðèè îò-íîñèòåëüíîñòè (ÍÒÎ) [2]. Ñîãëàñíî äàííîìó ïðèíöèïó, ãðàâèòàöèÿ è óñêî-ðåíèå ëîêàëüíî íåîòëè÷èìû äðóã îò äðóãà. ×àñòüþ ÏÝÝ ÿâëÿåòñÿ ýôôåêò ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí ïðè èõ ïðîõîäå ìåæäó ðàçíå-ñåííûìè â ïðîñòðàíñòâå ïîçèöèÿìè ñ íåíóëåâîé ðàçíîñòüþ ãðàâèòàöèîí-íûõ ïîòåíöèàëîâ. Äëÿ ïðåöèçèîííîãî èçìåðåíèÿ äàííîãî ýôôåêòà íàìè áûëà ðàçðàáîòàíà ýêñïåðèìåíòàëüíàÿ ìàòîäèêà, îñíîâàííàÿ íà èñïîëüçî-âàíèè âûñîêîòî÷íûõ àòîìíûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû, ðàçìåùåííûõ êàê íà íàçåìíîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ (ÍÂÑ×), òàê è íà áîðòó îêîëîçåìíîãî êîñìè-÷åñêîãî àïïàðàòà (ÁÂÑ×).
Èñòîðè÷åñêè ïåðâàÿ ïîñëåäîâàòåëüíàÿ òåîðèÿ ãðàâèòàöèè áûëà ñôîðìóëè-ðîâàíà È. Íüþòîíîì è ïîóáëèêîâàíà â åãî ôóíäàìåíòàëüíîì òðóäå ¾Ìàòå-ìàòè÷åñêèå íà÷àëà íàòóðàëüíîé ôèëîñîôèè¿ â 1687 ãîäó. Â ðàìêàõ íüþòî-íîâñêîé òåîðèè ñâîáîäíûå ìàññèâíûå òåëà (÷àñòèöû) ñóùåñòâóþò è ïåðå-ìåùàþòñÿ â àáñîëþòíîì ïðîñòðàíñòâå-âðåìåíè òîëüêî ïîä äåéñòâèåì ñèë âçàèìíîãî ïðèòÿæåíèÿ èëè ¾ñèë ãðàâèòàöèè¿. ×èñëåííî ñèëà ïðèòÿæå-íèÿ ïàðû òî÷å÷íûõ (èëè ñôåðè÷åñêè ñèììåòðè÷íûõ ÷àñòèö îäíîðîäíîé ïëîòíîñòè) ïðåäñòàâëÿåòñÿ çàêîíîì âñåìèðíîãî òÿãîòåíèÿ Íüþòîíà (¾çà-êîí îáðàòíûõ êâàäðàòîâ¿), â êîòîðîì åñòåñòâåííî ââîäèòñÿ ýìïèðè÷åñêàÿ êîíñòàíòà ¾ãðàâèòàöèîííàÿ ïîñòîÿííàÿ¿, õàðàêòåðèçóþùàÿ ãðàâèòàöèîí-íîå âçàèìîäåéñòâèå òåë.

Óòî÷íåíèå (ïðîâåðêà) ýìïèðè÷åñêèõ îñíîâ ÎÒÎ

Óíèêàëüíîå ñâîéñòâî ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ ïðèäàâàòü ìàòåðèàëüíûì òåëàì îäíî è òî æå óñêîðåíèå íåçàâèñèìî îò ìàññû áûëî èçâåñòíî óæå ðîäîíà-÷àëüíèêàì ôèçè÷åñêîé ìåõàíèêè èç ýêñïåðèìåíòîâ ñî ñâîáîäíûì ïàäåíèåì (Ãàëèëåé 1630 ã.), ñ êîëåáàíèÿìè ìåõàíè÷åñêèõ ìàÿòíèêîâ è íàáëþäåíèÿìè çà äèíàìèêîé ñïóòíèêîâ Þïèòåðà (Íüþòîí 1686 ã.). Ïðè òåõ æå íà÷àëüíûõ óñëîâèÿõ òîæäåñòâåííîñòü óñêîðåíèé ïðîáíûõ òåë îçíà÷àåò ðàâåíñòâî èõ ¾èíåðòíûõ¿ è ¾ãðàâèòàöèîííûõ¿ ìàññ è ñîâïàäåíèå èõ òðàåêòîðèé â çîíå ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ. Âïîñëåäñòâèè ñîâïàäåíèå ãðàâèòàöèîííûõ òðàåêòîðèé ïîëó÷èî íàçâàíèå ¾ñëàáîãî ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè¿ (ÑÏÝ) èëè ¾óíèâåðñàëüíîñòè ñâîáîäíîãî ïàäåíèÿ¿ (FFU íà àíãëèéñêîì) [1]. Ïîðåø-íîñòü ýòîãî óòâåðæäåíèÿ èñòîðè÷åñêè ïîñòîÿííî ñíèæàëàñü â ðåçóëüòà-òå óëó÷øåíèÿ òåñòîâûõ ýêñïåðèìåíòîâ. Íà÷èíàÿ ñ îòíîñèòåëüíîé îøèáêè 10^{2} – 10^{3} (Ãàëèëåé è Íüþòîí), ïîãðåøíîñòü ïðèøëà íà óðîâíè: 10^{8} (Ýòâ¼ø) [6], 10^{11} (Äèêêå è äð. 1962 ã.) [4], 10^{13} (ëàçåðíàÿ ëîêàöèÿ Ëóíû 2010 ã.) [5], 10^{15} (êîñìè÷åñêèé ýêñïåðèìåíò ¾MICROSCOPE¿ 2022 ã.) [10]. Â ðåçóëüòàòå ñîâðåìåííàÿ ôîðìóëèðîâêà ÑÏÝ ãëàñèò, ÷òî òðàåêòîðèÿ ñâîáîäíî ïàäàþùåãî ïðîáíîãî òåëà íå çàâèñèò îò åãî ìàññû è âíóòðåííåé ñòðóêòóðû (ìîëåêóëÿðíî-àòîìíîãî ñîñòàâà).

Çàìåòèì, ÷òî ÑÏÝ ÿâëÿåòñÿ ÷àñòüþ ýìïèðè÷åñêîé (îïûòíîé) áàçû ÏÝÝ. Òåîðåòè÷åñêàÿ áàçà ÏÝÝ âêëþ÷àåò â ñåáÿ ñïåöèàëüíóþ òåîðèþ îòíñèòåëüíîñòè (ÑÒÎ)[11], êîòîðàÿ óòâåðæäàåò ðàâíîïðàâèå èíåðöèàëüíûõ (íåóñêîðåííûõ) ñèñòåì îòñ÷åòà ïðè îòêàçå îò ¾ãèïîòåçû äàëüíîäåéñòâèÿ Íüþòîíà¿ è ïðèíÿòèè ïîñòóëàòà î íàëè÷èè ¾ìàêñèìàëüíîé ñêîðîñòè ðàñïðîñòðàíåíèÿ âçàèìîäåéñòâèé¿ ðàâíîé ñêîðîñòè ñâåòà. Ïîñëåäíåå âåäåò ê èçìåíåíèÿì ìàòåìàòè÷åñêîé ôîðìóëèðîâêè ¾ïðèíöèïà îòíîñèòåëüíîñòè¿ èíåðöèàëüíûõ ñèñòåì îòñ÷åòà, à èìåííî: çàìåíå ¾ïðåîáðàçîâàíèé Ãàëèëåÿ¿ íà ¾ïðåîáðàçîâàíèÿ Ëîðåíöà¿. Ýòî, â ñâîþ î÷åðåäü, îçíà÷àåò óïðàçäíåíèå êàòåãîðèè àáñîëþòíîãî âðåìåíè è ðàñïðîñòðàíåíèå ïðèíöèïà îòíîñèòåëüíîñòè íà âñ¼ ïðîñòðàíñòâî-âðåìÿ. Êðîìå òîãî, ãàðàíòèðóåòñÿ èíâàðèàíòíîñòü ýëåêòðîäèíàìè÷åñêèõ óðàâíåíèé Ìàêñâåëëà [12], èçîòðîïèÿ ñêîðîñòè ñâåòà è ââîäèòñÿ íîâûé ðåëÿòèâèñòñêèé çàêîí ñëîæåíèÿ ñêîðîñòåé. Â èòîãå, ÑÒÎ (ïðåäñòàâëåííàÿ Ýéíøòåéíîì â 1905 ã.) äàëà íîâóþ òåîðåòè÷åñêóþ îñíîâó

äëÿ ïîíèìàíèÿ ôèçè÷åñêèõ ïðîöåññîâ ïðè ñêîðîñòÿõ, áëèçêèõ ê ñêîðîñòè ñâåòà.

Âåðíåìñÿ ñíîâà ê áîëåå äåòàëüíîìó îïèñàíèþ ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè Ýéíøòåéíà. Ýòà îáîáùåííàÿ ôîðìóëèðîâêà ïðèíöèïîâ ÎÒÎ, ðàçðàáîòàííàÿ Ðîáåðòîì Äèêêå, áûëà ïîóáëèêîâàíà â åãî ëåêöèÿõ íà íàó÷íîé øêîëå â Ëåç-Óøå 1964 ãîäà [8]. Ñîãëàñíî Äèêêå, ÏÝÝ ñîñòîèò èç òðåõ ôóíäàìåíòàëüíûõ ïîëîæåíèé, à èìåííî, èìåþò ìåñòî:

1. ñïðàâåäëèâîñòü ñëàáîãî ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè (ÑÏÝ), óñòàíàâëèâàþùåãî ðàâåíñòâî èíåðòíîé è ãðàâèòàöèîííîé ìàññ è ôàêò óíèâåðñàëüíîñòè òðàåêòîðèé ñâîáîäíîãî ïàäåíèÿ (UFF);
2. ëîêàëüíàÿ ëîðåíö-èíâàðèàíòíîñòü (LLI), ò.å. íåçàâèñèìîñòü ðåçóëüòàòîâ ëþáûõ ëîêàëüíûõ íåãðàâèòàöèîííûõ ýêñïåðèìåíòîâ îò ñêîðîñòè ñâîáîäíî ïàäàþùåé ñèñòåìû îòñ÷åòà;
3. ëîêàëüíàÿ ïîçèöèîííàÿ èíâàðèàíòíîñòü (èëè óíèâåðñàëüíîñòü ¾RedShift¿) (LPI, URS), ò.å. èíâàðèàíòíîñòü ðåçóëüòàòîâ ëîêàëüíûõ íåãðàâèòàöèîííûõ ýêñïåðèìåíòîâ îòíîñèòåëüíî èõ ïîëîæåíèÿ â ïðîñòðàíñòâå-âðåìåíè.

Ïîä ëîêàëüíûì íåãðàâèòàöèîííûì ýêñïåðèìåíòîì [9] çäåñü ïîíèìàåòñÿ òàêîé, êîòîðûé ïðîâîäèòñÿ â äîñòàòî÷íî ìàëîé îáëàñòè ïðîñòðàíñòâà-âðåìåíè è íå ñâÿçàí ñ ïðÿìûì èçìåðåíèåì ãðàâèòàöèîííûõ âçàèìîäåéñòâèé. Òàêèì îáðàçîì, åñëè òðè ïåðå÷èñëåííûõ ïîëîæåíèÿ âûïîëíÿþòñÿ îäíîâðåìåííî, òî ñïðàâåäëèâ ÏÝÝ. Òîãäà â ëîêàëüíûõ ñâîáîäíî ïàäàþùèõ ñèñòåìàõ îòñ÷åòà çàêîíû, óïðàâëÿþùèå ýêñïåðèìåíòàìè, íå äîëæíû çàâèñåòü îò ñêîðîñòè ñèñòåìû îòñ÷åòà (ëîêàëüíàÿ ëîðåíö-èíâàðèàíòíîñòü), à òàêæå îò ìåñòîïîëîæåíèÿ ñèñòåìû îòñ÷åòà (ëîêàëüíàÿ ïîçèöèîííàÿ èíâàðèàíòíîñòü), ÷òî ïðåäïîëàãàåò ïîñòîÿíñòâî àòîìíûõ êîíñòàíò â ýòèõ ñèñòåìàõ îòñ÷åòà.

Çàêîíû, êîòîðûå óäîâëåòâîðÿþò ýòîìó, ñîâìåñòèìû ñî ñïåöèàëüíîé òåîðèåé îòíîñèòåëüíîñòè òàêèå êàê óðàâíåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíîãî ïîëÿ (óðàâíåíèÿ Ìàêñâåëëà) è ñòàíäàðòíàÿ ìîäåëü ôèçèêè ýëåìåíòàðíûõ ÷àñòèö.

Òàêæå â ëîêàëüíûõ ñâîáîäíî ïàäàþùèõ ñèñòåìàõ îòñ÷åòà ïðîáíûå òåëà íå èìåþò óñêîðåíèÿ è äâèæóòñÿ ïî óíèâåðñàëüíûì òðàåêòîðèÿì - ïðÿìûì

ëèíèÿì, êîòîðûå ñîîòâåòñòâóþò ¾ãåîäåçè÷åñêèì¿ â òåðìèíàõ èñêðèâëåí-íîãî ïðîñòðàíñòâà-âðåìåíè, ò.å. âûïîëíÿåòñÿ (UFF).

Ýìïèðè÷åñêèì îñíîâàíèÿìè ïîëîæåíèé ÏÝÝ ÿâëÿëèñü:

- äëÿ (1) ýêñïåðèìåíòû ïî íàáëþäåíèþ ñâîáîäíîãî ïàäåíèÿ òåë,
- äëÿ (2) íàáëþäåíèÿ ïîâåäåíèÿ ïðîáíûõ òåë (âêëþ÷àÿ ôîòîíû) âî âðàùàþùèõñÿ ñèñòåìàõ îòñ÷åòà,
- äëÿ (3) íàáëþäåíèÿ ñìåùåíèÿ ñïåêòðàëüíûõ ëèíèé óäàëåííûõ çâåçä (¾RedShift¿ ýôôåêò).

Êîììåíòèðóÿ òðåòèé ïóíêò ÏÝÝ, ¾ïîçèòèíííàÿ èíâàðèàíòíñòü¿, íàïîìíèì, ÷òî ýôôåêò ¾RedShift¿ ôóíêöèÿ òîëüêî ðàçíîñòè ïîòåíöèàëîâ ìåæäó òî÷êàìè ïðîõîäà ÅÌ âîëíû áåç îãðàíè÷åíèé íà ïîëîæåíèÿ ýòèõ òî÷åê âî Âñåëåííîé, ò.å. ýòî òåñò å¼ îäíîðîäíîñòè; ðàâíî, êàê ôèêñàöèÿ ïîñòîÿíñòâà àòîìíûõ êîíñòàíò ïî ñïåêòðàì óäàëåííûõ çâåçä.

Êëþ÷åâîå çíà÷åíèå ÏÝÝ çàêëþ÷àåòñÿ â òîì, ÷òî îí óñòàíàâëèâàåò ãëóáîêóþ ñâÿçü ìåæäó ðàâèòàöèåé è ãåîìåòðèåé ïðîñòðàíñòâà-âðåìåíè. Òåîðèè ðàâèòàöèè, êîòîðûå ïîëíîñòüþ ðåàëèçóþò ÏÝÝ, äîëæíû óäîâëåòâîðÿòü ïîñòóëàòàì ìåòðè÷åñêèõ òåîðèé ãðàâèòàöèè, à èìåííî:

- ïðîñòðàíñòâî-âðåìÿ îáëàäàåò ñèììåòðè÷íîé ìåòðèêîé, êîòîðàÿ îïðåäåëÿåò åãî ãåîìåòðè÷åñêèå ñâîéñòâà è ñëóæèò ìàòåìàòè÷åñêèì èíñòðóìåíòîì äëÿ îïèñàíèÿ õàðàêòåðà åãî èñêðèâëåíèÿ;
- äâèæåíèå ñâîáîäíûõ ïðîáíûõ òåë ïðîèñõîäèò ïî ãåîäåçè÷åñêèì ëèíèÿì, îïðåäåëÿåìûì äàííîé ìåòðèêîé (òåëà äâèæóòñÿ ïî êðàò÷àéøèì ïóòÿì â èñêðèâëåííîì ïðîñòðàíñòâå-âðåìåíè);
- â ëîêàëüíûõ ñâîáîäíî ïàäàþùèõ ñèñòåìàõ îòñ÷åòà íåãðàâèòàöèîííûå ôèçè÷åñêèå çàêîíû ïðèíèìàþò òó æå ôîðìó, ÷òî è â ñïåöèàëüíîé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè, ÷òî îáåñïå÷èâàåò ëîêàëüíóþ ýêâèâàëåíòíîñòü ìåæäó ãðàâèòàöèîííûìè è èíåðöèàëüíûìè ýôôåêòàìè.

Â èòîãå, íàáëþäàåìûå ãðàâèòàöèîííûå ýôôåêòû ìîæíî ðàññìàòðèâàòü êàê ãåîìåòðè÷åñêèå ñâîéñòâà èñêðèâëåííîãî ïðîñòðàíñòâåííî-âðåìåííîãî êîíòèíóóìà.

Çàêàí÷èâàÿ íàøå ïðåäñòàâëåíèå ðàçëè÷íûõ àñïåêòîâ ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè Ýéíøòåéíà (ÏÝÝ) óìåñòíî íàïîìíèòü, òàê íàçûâàåìóþ ¾ãèïîòåçó Øèôôà¿ [13], ñîñòîÿùóþ â ñëåäóþùåì óòâåðæäåíèè: ¾Ëþáàÿ ïîëíàÿ ñàìîñîãëàñîâàííàÿ òåîðèÿ ãðàâèòàöèè, âêëþ÷àþùàÿ â ñåáÿ ñëàáûé ïðèíöèï ýêâèâàëåíòíîñòè (ÑÏÝ), îáÿçàòåëüíî âêëþ÷àåò òàêæå è ÏÝÝ¿. Äàííàÿ ãèïîòåçà âûãëÿäèò îáîñíîâàííé, ïî êðàéíåé ìåðå, äëÿ òåîðèé, â êîòîðûõ âûïîëíÿåòñÿ çàêîí ñîõðàíåíèÿ ýíåðãèè.

Ýêñïëóàòàöèÿ òåõíè÷åñêîé áàçû ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿

Çíà÷èìûì äîñòèæåíèåì ýêñïåðèìåíòàëüíîé àñòðîíîìèè ñòàëà óñïåøíàÿ ðåàëèçàöèÿ ïðîåêòà ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ ñî ñïóòíèêîì Ñïåêòð-Ð, íåñóùèì ïàðàáîëè÷åñêóþ àíòåííó ñ äèàìåòðîì 10 ìåòðîâ. Â ñî÷åòàíèè ñ íàçåìíûìè àíòåííàìè ýòîò êîñìè÷åñêèé ðàäèîòåëåñêîï ôîðìèðîâàë èíòåðôåðîìåòð ñ ðåêîðäíîé äëèíîé áàçû, äîñòèãàþùåé îêîëî 350,000 êì. Èñïîëüçîâàíèå ìèêðîâîëíîâûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû êàê íà ñïóòíèêå, òàê è íà íàçåìíûõ ñòàíöèÿõ, ïðèâåëî ê çíà÷èòåëüíîìó óëó÷øåíèþ óãëîâîãî ðàçðåøåíèÿ ðàäèîèíòåðôåðîìåòðè÷åñêèõ èçìåðåíèé [14]. Ýòî äîñòèæåíèå îòêðûâàëî íîâûå ãîðèçîíòû â àñòðîôèçèêå, ïîçâîëÿÿ ïîëó÷àòü áîëåå äåòàëèçèðîâàííûå è òî÷íûå äàííûå î êîñìè÷åñêèõ îáúåêòàõ è ÿâëåíèÿõ. Âñåãî çà âðåìÿ ðàáîòû ÊÐÒ, ñ 2011 ïî 2019 ãîäû, íà í¼ì áûëî ðåàëèçîâàíî äî äåñÿòè ðàçëè÷íûõ àñòðîíîìè÷åñêèõ ïðîãðàìì. Îò÷¼òû îá ýòèõ èññëåäîâàíèÿõ õðàíÿòñÿ â Àñòðîêîñìè÷åñêîì öåíòðå Ôèçè÷åñêîãî èíñòèòóòà èìåíè Ï. Í. Ëåáåäåâà (ÀÊÖ ÔÈÀÍ), à èõ ðåçóëüòàòû îïóáëèêîâàíû â ìíîãî÷èñëåííûõ íàó÷íûõ ñòàòüÿõ, ïîäãîòîâëåííûõ ãðóïïîé ¾ÐàäèîÀñòðîí¿. Îñíîâíîé öåëüþ ìèññèè ÐÀ ÿâëÿëîñü ôóíêöèîíèðîâàíèå ÊÐÒ â êà÷åñòâå êîñìè÷åñêîãî ðàäèîèíòåðôåðîìåòðà è âûïîëíåíèå ïðåöèçèîííûõ àñòðîìåòðè÷åñêèõ èçìåðåíèé. Îäíàêî åù¼ íà ýòàïå ïðîåêòèðîâàíèÿ ðàññìàòðèâàëèñü è äóãèå ïîòåíöèàëüíûå ïðèìåíåíèÿ ýòîãî óíèêàëüíîãî èíñòðóìåíòà äëÿ èçó÷åíèÿ ôóíäàìåíòàëüíûõ ôèçè÷åñêèõ ïðîáëåì. Â ÷àñòíîñòè, óêàçûâàëîñü íà âàæíîñòü èçìåðåíèÿ ðåëÿòèâèñòñêèõ ãðàâèòàöèîííûõ ýôôåêòîâ â óñëîâèÿõ ñóùåñòâåííîãî îòëè÷èÿ ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ ìåæäó àïîãåéì ($3 \quad 10^5$ êì). è ïåðèãåéì ($1 \quad 10^4$ êì) îðáèòû ñïóòíèêà Ñïåêòð-Ð [15]. Áëàãîïðèÿòíûì ôàêòîðîì ÿâëÿëîñü íàëè÷èå áîðòîâûõ è íàçåìíûõ

âîäîðîäíûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû (ñòàáèëüíîñòüþ íå õóæå 1 10 ^{14}), ÷òî ïîçâîëÿëî îñóùåñòâèòü ïðîâåðêó ýôôåêòà ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíîãî èçëó÷åíèÿ.

Âûïîëíåíîå íàìè èññëåäîâàíèÿ áûëè ïîñâÿùåíû ïðåöèçèîííîé ïðîâåðêå òàêîãî àñïåêòà ÏÝÝ êàê ¾RedShift¿ ýôôåêò ñ ïîìùüþ ¾àòîìíûõ ÷àñîâ¿.

Èñïîëüçîâàëèñü ñëåäóþùèå ýëåìåíòû òåõíè÷åñêîé áàçû ÊÐÒ ¾Ðàäèî-Àñòðîí¿:

- íàçåìíûå ñòàíöèè ñëåæåíèÿ (ÍÑÑ) â Ïóùèíî (Ðîññèÿ) è Ãðèí Áýíê (ÑØÀ), îáëàäàþùèå âîçìîæíîñòüþ íå òîëüêî ïðèíèìàòü, íî è ïåðåäàâàòü ñèãíàëû (êîìàíäû) íà êîñìè÷åñêèé àïïàðàò (ÊÀ) Ñïåêòð-Ð;
- âîäîðîäíûå ñòàíäàðòû ÷àñòîòû, óñòàíîâëåííûå íà áîðòó ÊÀ (ÁÂÑ×) è ÍÑÑ (ÍÂÑ×), îáåñïå÷èâàëè ñòàáèëüíîñòü êîìóíèêàöèîííûõ ñèãíàëîâ è âûñîêîòî÷íóþ ñèíõðîíèçàöèþ èçìåðåíèé ïî âðåìåíè;
- ñåòü âñïîìîãàòåëüíûõ íàçåìíûõ ðàäèîêîìàöèîííûõ ñòàíöèé è ñòàíöèé ëàçåðíîé äàëüíîìåòðèè, îáåñïå÷èâàþùèå âûñîêîòî÷íîå âîññòàíîâëåíèå ðåêîíñòðóèðîâàííé îðáèòû ÊÀ;
- òåëåêîìóíèêàöèîííîå îáîðóäîâàíèå (êîìïëåêñ ÂÈÐÊ) îáåñïå÷èâàëî íàäåæíóþ ïåðåäà÷ó äàííûõ ìåæäó ÊÀ è ÍÑÑ ñ èõ ïðäâàðèòåëüíîé îðàáîòêîé.

Êîìóíèêàöèîííûå ÷àñòîòû 8,4 ÃÃö è 15 ÃÃö èñïîëüçîâàëèñü äëÿ ïåðåäà÷è èíôîðìàöèè î âðåìåíè è ÷àñòîòå. Èíòåãðàëüíàÿ èíôîðìàöèÿ ñî âñåõ óêàçàííûõ èçìåðèòåëüíûõ óçëîâ ïîçâîëèëà ïðîâîäèòü ýêñïåðèìåíòû ïî óòî÷íåíèþ ÏÝÝ ñ îòíñèòåëüíîé ïîãðåøíîñòüþ, íå ïðåâûøàþùåé 10 ^{4}.

Àêòóàëüíîñòü òåìû äèññåðòàöèîííîãî èññëåäîâàíèÿ

Ñîâðåìåííàÿ òåîðåòè÷åñêàÿ ôèçèêà ñòîëêíóëàñü ñ ôóíäàìåíòàëüíûì âûçîâîì, ñâÿçàííûì ñ íåîáõîäèìîñòüþ îáúÿñíåíèÿ äâóõ íàèáîëåå óñïåøíûõ ôèçè÷åñêèõ òåîðèé XX âåêà îáùåé òåîðèè îòíñèòåëüíîñòè (ÎÒÎ) è êâàíòîâîé òåîðèè ïîëÿ. Îäíàêî ýòè òåîðèè, ñîñòàâëÿþùèå îñíîâó íàøåãî ïîíèìàíèÿ Âñåëåííîé íà ìàêðî- è ìèêðîóðîâíÿõ ñîòâåòñòâåííî, íà

òåêóùèé ìîìåíò ñîäåðæàò ïðîòèâîðå÷èÿ â ñâîèõ áàçîâûõ ïîñòóëàòàõ è ìàòåìàòè÷åñêîì àïïàðàòå.

Îñîáóþ òåñòîâóþ çíà÷èìîñòü â ýòîì êîíòåêñòå ïðèîáðåòàåò ÏÝÝ êðàåóãîëüíûé êàìåíü ÎÒÎ. Ýòîò ïðèíöèï, óòâåðæäàþùèé ýêâèâàëåíòíîñòü ãðàâèòàöèîííîé è èíåðòíîé ìàññ, ïðîøåë ìíîãî÷èñëåííûå ýêñïåðèìåíòàëüíûå ïðîâåðêè ñ âûñîêîé òî÷íîñòüþ. Îäíàêî ñîâðåìåííûå òåîðèè êâàíòîâîé ãðàâèòàöèè (âêëþ÷àÿ òåîðèþ ñòðóí, ïåòëåâóþ êâàíòîâóþ ãðàâèòàöèþ è äðóãèå ïîäõîäû) ÷àñòî ïðåäñêàçûâàþò âîçìîæíûå íàðóøåíèÿ ÏÝÝ íà ïîðåäëåííûõ ìàñøòàáàõ.

Íàøå èññëåäîâàíèå, âûïîëíåííå â äàííîé äèññåðòàöèè, íàïðàâëåíî íà ðàçðàáîòêó ìåòîäèêè ïðîâåðêè ÏÝÝ ñ èñïîëüçîâàíèåì ¾RedShift¿ ýôôåêòà è å¼ èìïëåìåíòàöèÿ.

1. Ïðîâåðêà ñïðàâåäëèâîñòè ðàâåíñòâà:

$$\frac{f_{grav}}{f} = \frac{U}{c^2} \quad 10^{\ 10}; \qquad (0.1)$$

ãäå U ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ íà ÊÀ ¾ÐäèîÀñòðîí¿ è ÍÑÑ.

2. Äîñòèæåíèå òî÷íîñòè èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ ñ ïîãðåøíîñòüþ, íå ïðåâûøàþùåé:

$$" = \frac{f}{f_0} < 1 \quad 10^{\ 4}: \qquad (0.2)$$

Ðåçóëüòàòû ðàáîòû áóäóò èìåòü çíà÷åíèå äëÿ:

ñäëåöèè êîíêóðèðóþùèõ ðåëÿòèâèñòñêèõ òåîðèé ãðàâèòàöèè (ñêàëÿðíî-òåíçîðíûõ è áèìåòðè÷åñêèõ, òåîðèè ñòðóí, ìîäåëåé êâàíòîâîé òåîðèè ãðàâèòàöèè è äð.),

êîñìîëîãè÷åñêèõ ìîäåëåé ðàííåé Âñåëåííîé,

ðàçâèòèÿ ôóíäàìåíòàëüíîé ìåòðîëîãèè.

Â öåëîì, ïðîâåäåíèå äàííîãî ýêñïåðèìåíòàëüíîãî èññëåäîâàíèÿ îáíàðóæåíèÿ îòêëîíåíèé îò ïðåäñêàçàíèé ÎÒÎ è ÏÝÝ ïðèîáðåòàåò êëþ÷åâîå çíà÷åíèå äëÿ óòî÷íåíèÿ è ðàçâèòèÿ ñîâðåìåííûõ ïðåäñòàâëåíèé î ôèçè÷åñêîé ïðèðîäå ìèðà. Ðåøåíèå ýòîé çàäà÷è ìîæåò îòêðûòü ïóòü ê ñîçäàíèþ åäèíîé òåîðèè, ñîîñîáíîé îáúÿñíèòü âñå ôóíäàìåíòàëüíûå âçàèìîäåéñòâèÿ âî Âñåëåííîé.

Öåëè ðàáîòû

Öåëü äèññåðòàöèîííîé ðàáîòû çàêëþ÷àåòñÿ â ïðîâåäåíèè âûñîêîòî÷íûõ èçìåðåíèé ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû (ýôôåêòà ¾RedShift¿) ñ èñïîëüçîâàíèåì êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ è íàçåìíûõ ñòàíöèé ñëåæåíèÿ äëÿ ýêñïåðèìåíòàëüíîé ïðîâåðêè ïðåäñêàçàíèé îáùåé òåîðèè îòíñèòåëüíîñòè.

Â êà÷åñòâå áàçîâûõ ýëåìåíòîâ ÷àñòîòíîãî îáåñïå÷åíèÿ ýêñïåðèìåíòàëüíîé óñòàíîâêè áûëè èñïîëüçîâàíû âîäîðîäíûå ñòàíäàðòû ÷àñòîòû ìîäåëè VCH-1010 , ïðîèçâåäåíîå îòå÷åñòâåííîé êîìïàíèåé Âðåìÿ-× [1]. Ñòàáèëüíîñòü ýòèõ ñòàíäàðòîâ âûðàæàåòñÿ â òåðìèíàõ äèñïåðñèè Àëëàíà è ñîñòàâëÿåò f=f = 7:0 10 [15] ïðè âðåìåíè óñðåäíåíèÿ 10[2] ñ. Ïðèìåíåíèå ñòîëü âûñîêîñòàáèëüíûõ ýòàëîííâ ÷àñòîòû îáåñïå÷èëî ðåøåíèå ñëåäóþùèõ êëþ÷åâûõ çàäà÷ èññëåäîâàíèÿ:

1. ïðåöèçèîííîå èçìåðåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíîãî èçëó÷åíèÿ ñ ïîòåíöèàëüíîé îòíñèòåëüíîé ïîãðåøíîñòüþ ìåíåå 10 [4],
2. âûäåëåíèå ðåëÿòèâèñòñêîé êîìïîíåíòû íà ôîíå äóãèõ äîìèíèðóþùèõ íåãðàâèòàöèîííûõ ôàêòîðîâ,
3. ïðîâåðêà òåîðåòè÷åñêèõ ïðåäñêàçàíèé ÎÒÎ â óñëîâèÿõ óäàëåííûõ ãðàâèòàöèîííûõ ïîëåé.

Îñíîâíûå çàäà÷è

Îáíàðóæåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîò íå ÿâëÿåòñÿ ñëîæíîé çàäà÷åé â òåîðèè, îäíàêî äëÿ ïðîâåäåíèÿ âûñîêîòî÷íûõ èçìåðåíèé íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü ìíîæåñòâî ñîïóòñòâóþùèõ øóìîâ, êîòîðûå ìîãóò âîçíèêàòü íà ëèíèè ñâÿçè ìåæäó êîñìè÷åñêèì àïïàðàòîì (ÊÀ) è íàçåìíûìè ñòàíöèÿìè (ÍÑÑ), à òàêæå â ñàìèõ ñòàíäàðòàõ ÷àñòîòû.

Ýòè øóìû ìîãóò âêëþ÷àòü â ñåáÿ:

1. êèíåìàòè÷åñêèå ýôôåêòû: ýôôåêò Äîïëåðà 1-ãî è 2-ãî ïîðÿäêà ìàëîñòè [17];

[1] https://www.vremya-ch.com/index.php/projects-ru/spaceapplications-ru/vch-1010-ru/index.html

2. àòìîñôåðíûå ïîìåõè: âëèÿíèå òðîïîñôåðû è èîíîñôåðû íà ïåðåäà÷ó ñèãíàëîâ ìåæäó íàçåìíûìè ñòàíöèÿìè è ñïóòíèêîì;
3. òåõíè÷åñêèå øóìû àïïàðàòóðû: íåñîâåðøåíñòâî îáîðóäîâàíèÿ, ïðèìåíÿåìîãî äëÿ ãåíåðàöèè è ïåðåäà÷è ñèãíàëîâ, ìîæåò âûçûâàòü äîïîëíèòåëüíûå ôëóêòóàöèè;
4. ãðàâèòàöèîííîå âëèÿíèå äóãèõ êîñìè÷åñêèõ îáúåêòîâ è ïðèëèâîîãî ïîòåíöèàëà Çåìëè [18].

Äëÿ ìèíèìèçàöèè âëèÿíèÿ ýòèõ øóìîâ ïðèìåíÿëèñü ñëåäóþùèå ïîäõîäû:

1. èñïîëüçîâàíèå ÷åðåäîâàíèÿ ðåæèìîâ ïåðåäà÷è ñèãíàëà: äâóõïóòåâîé ÍÑÑ-ÊÀ-ÍÑÑ è îäíîïóòåâîé ÊÀ-ÍÑÑ;
2. àíàëèç èñïîëüçîâàíèÿ ìîäåëåé êîìïåíñàöèè âëèÿíèÿ èîíîñôåðû è òðîïîñôåðû: äàíîûå î ïîëíîì ýëåêòðîííîì ñîäåðæàíèè (TEC) â èîíîñôåðå, à òàêæå î âëàæíîñòè, äàâëåíèè è òåìïåðàòóðå â òðîïîñôåðå [21];
3. ðàñ÷åò ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà Ëóíû, Ñîëíöà, à òàêæå ó÷åò íåñôåðè÷íîñòè Çåìëè [17].

Íàó÷íàÿ íîâèçíà

Â ðàìêàõ ïðîâåäåííîé ðàáîòû âïåðâûå îñóùåñòâëåíû ïðåöèçèîííûå èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû (ýôôåêòà ¾RedShift¿) â óíèêàëüíûõ óñëîâèÿõ íà îðáèòàëüíûõ ðàññòîÿíèÿõ, ñîîòâåòñòâóþùèõ ëóííîé äèñòàíöèè (400 òûñ. êì).
Èäåÿ êîñìè÷åñêîãî ýêñïåðèìåíòà ïî èçìåðåíèþ ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ âïåðâûå áûëà ðàëèçîâàíà â ìèññèè ¾Gravity-Probe A¿ â 1976 ãîäó [47]. Â ðàìêàõ ýòîé ìèññèè âîäîðîäíûé ñòàíäàðò ÷àñòîòû áûë ïîäíÿò íà âûñîòó 10^4 êì ñ ïîìîùüþ áàëëèñòè÷åñêîé ðàêåòû. Â äîãåå òðàåêòîðèè åãî ÷àñòîòà ñðàâíèâàëàñü ñ àíàëîãè÷íûì íàçåìíûì ìàçåðîì. Èíôîðìàöèÿ î ÷àñòîòíûõ âàðèàöèÿõ ïåðåäàâàëàñü ïîñðåäñòâîì êîìóíèêàöèîííûõ ðàäèîñèãíàëîâ. Äëÿ îíëàéí êîìïåíñàöèè äîìèíèðóþùåãî ýôôåêòà Äîïïëåðà ïåðâîãî ïîðÿäêà áûëà ðàçðàáîòàíà ñïåöèàëüíàÿ òåõíèêà, êîìáèíèðóþùàÿ îäíîïóòåâûå (1w) ñèãíàëû, ñèíõðîíèçèðîâàííûå ïî áîðòîâîì ñòàíäàðòó, è

äâóõïóòåâûå (èëè ïåòëåâûå) (2w) ñèãíàëû ñ îïîðîé íà íàçåìíûé ñòàíäàðò ÷àñòîòû. Ðåçóëüòàòîì ýêñïåðèìåíòà ¾Gravity-Probe A¿ ñòàëî ïîäòâåðæäåíèå ÎÒÎ ñ òî÷íîñòüþ äî ñîòûõ äîëåé ïðîöåíòà, à èìåííî 1:4 10^{4}. Ýòîò ðåçóëüòàò îñòàâàëñÿ àêòóàëüíûì ê ìîìåíòó íà÷àëà ïðîâåäåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ýêñïåðèìåíòà ñ ÊÐÒ ¾ÐääèÎñòðîí¿. Òàêèå ïðåèìóùåñòâà ¾ÐääèÎñòðîíà¿, êàê áîëåå ÷åì íà ïîðÿäîê ëó÷øàÿ ñòàáèëüíîñòü áîðòîâîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû, âîçìîæíîñòü ìíîãîêðàòíîãî ïîâòîðåíèÿ ýêñïåðèìåíòà è ïðèìåíåíèå êîìïëåêñíîãî ïîäõîäà ê âîññòàíîâëåíèþ îðáèòû êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà ñ èñïîëüçîâàíèåì ðàçëè÷íûõ ìåòîäîâ, ïîçâîëÿëè îæèäàòü óëó÷øåíèÿ òî÷íîñòè èçìåðåíèÿ ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ äî 10^{5}. Ïîìèìî ïîâûøåíèÿ òî÷íîñòè èçìåðåíèé, ñëåäóåò ïîä÷åðêíóòü, ÷òî êîñìè÷åñêèé àïïàðàò ¾ÐääèÎñòðîí¿ ôóíêöèîíèðîâàë íà ðàññòîÿíèÿõ, ñîîïñòàâèìûõ ñ äèñòàíöèåé äî Ëóíû. Ýòî óíèêàëüíîå ñâîéñòâî, îòñóòñòâóþùåå ó äóõèõ ýêñïåðèìåíòîâ, òàêèõ êàê ¾Gravity Probe A¿ è ¾GREAT¿, îòêðûâàëî íîâûå âîçìîæíîñòè äëÿ ïðîâåäåíèÿ âûñîêîòî÷íûõ èçìåðåíèé â óñëîâèÿõ, íåäîñòóïíûõ äëÿ íàçåìíûõ è íèçêîîðáèòàëüíûõ ìèññèé.

Ìåòîäû èññëåäîâàíèÿ

Ðàáîòà áûëà ïîñâÿùåíà èññëåäîâàíèþ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíûõ ñèãíàëîâ â ðàìêàõ îáùåé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè (ÎÒÎ) ñ èñïîëüçîâàíèåì äàííûõ êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà ¾ÐääèÎñòðîí¿. Òåîðåòèêî-ìåòîäîëîãè÷åñêîé áàçîé äèññåðòàöèè ÿâëÿþòñÿ ðàáîòû [1, 6, 4] (ÏÝÝ è êðèòåðèè òåîðèé ãðàâèòàöèè Äèêêå), [40, 47, 44, 45, 10, 42] (Ýêñïåðèìåíòû ïî ïðîâåðêå ÏÝÝ ïðîâåäåííûå ðàíåå). Äëÿ èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû èñïîëüçîâàëñÿ êîñìè÷åñêèé ðàäèîòåëåñêîï ¾ÐääèÎñòðîí¿, îñíàù¼ííûé âûñîêîñòàáèëüíûì áîðòîâûì ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû. Äàííûå íàêàïëèâàëèñü â òå÷åíèå 2016 - 2018 ãã. ñ èñïîëüçîâàíèåì íàçåìíûõ ñòàíöèé, îñíàù¼ííûõ òàêæå áîðòîâûì ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû. Äëÿ àíàëèçà ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ïðèìåíÿëèñü óðàâíåíèÿ ÎÒÎ, â ÷àñòíîñòè, ñîîòíîøåíèÿ, ñâÿçûâàþùèå ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ ñ îòíîñèòåëüíûì ñìåùåíèåì ÷àñòîòû. Ýòè óðàâíåíèÿ ïîçâîëÿþò êîëè÷åñòâåííî îïèñàòü âëèÿíèå ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ íà ÷àñòîòó ýëåêòðîìàãíèòíûõ ñèãíàëîâ. Â äàííîé äèññåðòàöèîííîé ðàáîòå ïðèìåíÿ-

àòñÿ àäàïòèðîâàííûé êîìïåíñàöèîííûé àëãîðèòì ýôôåêòà Äîïëåðà 1-ãî ïîðÿäêà, ðàíåå ïðåäëîæåííûé â ðàáîòå [47]. Äëÿ ýòîãî áûëè ïðîâåäåíû òåîðåòè÷åñêèå îöåíêè âîçìîæíîñòè ðåàëèçàöèè êîìïåíñàöèîííé ñõåìû, îñíîâàííé íà ïîïåðåìåííì èñïîëüçîâàíèè îäíîïóò¼âîãî (1w) è äâóõïóò¼-âîãî (2w) ðåæèìîâ ðàáîòû, ñ öåëüþ óñòðàíåíèÿ âëèÿíèÿ ýôôåêòà Äîïëåðà ïåðâîãî ïîðÿäêà.

Â õîäå ðàáîòû áûë ïðèìåí¼í îöåíî÷íî-êîìïåíñàöèîííûé àëãîðèòì [34], êîòîðûé ïîçâîëèë ïðîäîëåòü îãðàíè÷åíèÿ, ñâÿçàííûå ñ íåâîçìîæíîñòüþ îäíîâðåìåííîãî èñïîëüçîâàíèÿ (1w) è (2w) ðåæèìîâ. Äàííûé ïîäõîä ïîçâîëèë êîìïåíñèðîâàòü ýôôåêò Äîïëåðà ïåðâîãî ïîðÿäêà è âëèÿíèå òðîïñôåðû. Â õîäå èññëåäîâàíèÿ áûëè ó÷òåíû âêëàäû èîíîñôåðû, ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà Ëóíû è Ñîëíöà, à òàêæå íåñôåðè÷íîñòè Çåìëè. Êðîìå òîãî, ïðîâåäåíà îöåíêà âåëè÷èíû ôëèêêåð-øóìà áîðòîâîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû, ÷òî ñïîñîáñòâîâàëî ïîâûøåíèþ òî÷íîñòè èçìåðåíèé. Ïîëó÷åíû óòî÷í¼íûå çíà÷åíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû, ïîäòâåðæäàþùèå ïðääñêàçàíèÿ ÎÒÎ ñ òî÷íîñòüþ, ïðåâîñõîäÿùåé ýêñïåðèìåíò ¾Gravity Probe A¿. Òàêæå áûëè âûâåäåíû àíàëèòè÷åñêèå âûðàæåíèÿ äëÿ îïèñàíèÿ ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû, îáóñëîâëåííîãî ýôôåêòîì Äîïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ìàëîñòè, ÷òî ïîçâîëèëî ó÷åñòü ðåëÿòèâèñòñêèå ýôôåêòû, âîçíèêàþùèå ïðè îòíñèòåëüíîì äâèæåíèè èñòî÷íèêà è ïðè¼ìíèêà ñèãíàëîâ. Ïîëó÷åííûå ðåçóëüòàòû êîìïåíñàöèè êèíàìàòè÷åñêèõ ýôôåêòîâ èìåþò âàæíîå çíà÷åíèå äëÿ ïîâûøåíèÿ òî÷íîñòè èçìåðåíèé, ïîñêîëüêó â ýêñïåðèìåíòå ¾Gravity Probe A¿ òî÷íîñòü îïðåäåëåíèÿ ñêîðîñòè ÊÀ ñòàëà êëþ÷åâûì ôàêòîðîì, îãðàíè÷èâàþùèì ôèíàëüíóþ îøèáêó èçìåðåíèÿ ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ ".

Äëÿ îáðàáîòêè äàííûõ ïðèìåíÿëèñü ðàçëè÷íûå ìåòîäû äåòåêòèðîâàíèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà. Íà íà÷àëüíîì ýòàïå èñïîëüçîâàëîñü ãðóáîå äåòåêòèðîâàíèå, îñíîâàííîå íà ñòàíäàðòíîì ñïåêòðàëüíîì ìåòîäå, êîòîðûé âêëþ÷àåò ïðèìåíåíèå àëãîðèòìà áûñòðîãî ïðåîáðàçîâàíèÿ Ôóðüå (FFT) ñ ïîñëåäóþùèì îïðåäåëåíèåì ÷àñòîòû ñèãíàëà ïî ïîëîæåíèþ ìàêñèìóìà àìïëèòóäû â ñïåêòðå. Ïåðâè÷íàÿ îáðàáîòêà äàííûõ îñóùåñòâëÿëàñü ñ èñïîëüçîâàíèåì ñïåêòðàëüíîãî èçìåðèòåëÿ, óñòàíîâëåííîãî íà ñòàíöèÿõ ñëåæåíèÿ, ÷àñòîòíûå äàííûå êîòîðîãî áûëè ðàçìåùåíû íà ñåðâåðå webinet. Òî÷íîñòü äàííîãî èçìåðèòåëÿ ñîñòàâëÿëà 2 10 ^{3} Ãö, ÷òî îãðàíè÷èâàëî åãî ïðèìåíåíèå äëÿ çàäà÷, òðåáóþùèõ âûñîêîé òî÷íîñòè èçìåðåíèé (" < 10 ^{4}).

Â ðàìêàõ íàøåãî èññëåäîâàíèÿ áûë ïðèìåí¼í ìåòîä èçìåðåíèÿ ÷àñòîòû, îñíîâàííûé íà îáðàáîòêå ïåðâè÷íûõ äàííûõ, ïðåäñòàâëåííûõ â ôîðìàòå RDF (Radioastron Data Format), êîòîðûé ñòðóêòóðíî áëèçîê ê ôîðìàòó Mark5B. Ýêñïåðèìåíòàëüíûå äàííûå áûëè ïðåäñòàâëåíû â âèäå âðåìåííûõ ðÿäîâ, ñîäåðæàùèõ â ñááå çàâèñèìîñòü àìïëèòóäû ñèãíàëà îò âðåìåíè. Äëÿ àíàëèçà èñïîëüçîâàëñÿ èòåðàòèâíûé ìåòîä îñòàíîâêè ôàçû ñèãíàëà, ïîçâîëÿþùèé ïîâûñèòü òî÷íîñòü ïîðåäåëåíèÿ ÷àñòîòû [22].

Äëÿ êîìïåíñàöèè êèíåìàòè÷åñêèõ ýôôåêòîâ, ñâÿçàííûõ ñ äâèæåíèåì êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà, áûëè èñïîëüçîâàíû äàííûå î ðåêîíñòðóêòîâàííé îðáèòå. Ðàçðàáîòàííîå ïðîãðàìííîå îáåñïå÷åíèå äëÿ îáðàáîòêè äàííûõ âêëþ÷àëî èñïîëüçîâàíèå ñïåöèàëèçèðîâàííûõ áèáëèîòåê, òàêèõ êàê SOFA (Standards of Fundamental Astronomy) [35], astropy è numpy.

Ðåçóëüòàò íàøåãî ýêñïåðèìåíòà ñðàâíèâàëñÿ ñ ðàíåå ïðîâåäåííûìè ýêñïåðèìåíòàìè ¾Gravity Probe A¿[47] è ¾GREAT¿[44, 45].

Òåîðåòè÷åñêàÿ è ïðàêòè÷åñêàÿ çíà÷èìîñòü

Òåîðåòè÷åñêàÿ çíà÷èìîñòü ðàáîòû çàêëþ÷àåòñÿ â óòî÷íåíèè ïàðàìåòðîâ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíûõ ñèãíàëîâ íà áîëüøèõ ðàññòîÿíèÿõ îò Çåìëè â ðàìêàõ ÎÒÎ. Ïîëó÷åííûå ðåçóëüòàòû âíîñÿò âêëàä â ðàçâèòèå ñîâðåìåííûõ ïðåäñòàâëåíèé î ãðàâèòàöèè è å¼ âëèÿíèè íà ðàñïðîñòðàíåíèå ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí â óñëîâèÿõ ñëàáûõ ãðàâèòàöèîííûõ ïîëåé [36]. Ðàçðàáîòàííûå ìåòîäû îáðàáîòêè äàííûõ, âêëþ÷àÿ àëãîðèòìû êîìïåíñàöèè êèíåìàòè÷åñêèõ ýôôåêòîâ è èòåðàòèâíûå ìåòîäû àíàëèçà ôàçû ñèãíàëà, ïîçâîëÿþò ñóùåñòâåííî ïîâûñèòü òî÷íîñòü èçìåðåíèé ïîñëåäóþùèõ ïðåöèçèîííûõ ýêñïåðèìåíòîâ. Ýòî îòêðûâàåò íîâûå âîçìîæíîñòè äëÿ ýêñïåðèìåíòàëüíîé ïðîâåðêè ïðåäñêàçàíèé ÎÒÎ è äóãèõ ôóíäàìåíòàëüíûõ ôèçè÷åñêèõ òåîðèé ñ èñïîëüçîâàíèåì êîñìè÷åñêèõ àïïàðàòîâ.

Ïðàêòè÷åñêàÿ çíà÷èìîñòü èññëåäîâàíèÿ çàêëþ÷àåòñÿ â âîçìîæíîñòè ïðèìåíåíèÿ ðàçðàáîòàííûõ ìåòîäîâ è àëãîðèòìîâ â ñèñòåìàõ ñïóòíèêîâîé íàâèãàöèè äëÿ ïîâûøåíèÿ òî÷íîñòè ïîçèöèîíèðîâàíèÿ, à òàêæå â ïðîåêòàõ, ñâÿçàííûõ ñ èçó÷åíèåì ãðàâèòàöèîííûõ âîëí è ðåëÿòèâèñòñêèõ ýôôåêòîâ. Ðåçóëüòàòû ðàáîòû ìîãóò áûòü èñïîëüçîâàíû äëÿ êàëèáðîâêè îáîðóäîâà-

íèÿ è óëó÷øåíèÿ òî÷íîñòè èçìåðåíèé â êîñìè÷åñêèõ ìèññèÿõ, íàïðàâëåííûõ íà èçó÷åíèå ãðàâèòàöèîííûõ ïîëåé è òåñòèðîâàíèå ôóíäàìåíòàëüíûõ ôèçè÷åñêèõ çàêîíîâ.

Êðîìå òîãî, ïðîâåä¼íîå èññëåäîâàíèå ñîçäà¼ò îñíîâó äëÿ äàëüíåéøèõ ðàáîò â îáëàñòè ðåëÿòèâèñòñêîé àñòðîôèçèêè, êâàíòîâîé ãðàâèòàöèè è êîñìîëîãèè, ñïîñîáñòâóÿ ðàçâèòèþ íîâûõ ïîäõîäîâ ê èçó÷åíèþ ãðàâèòàöèîííûõ âçàèìîäåéñòâèé [37, 38].

Ïîëîæåíèÿ, âûíîñèìûå íà çàùèòó

1. Òåîðåòè÷åñêèé ïðîãíîç îáùåé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè äëÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ñîîòâåòñòâóåò ýêñïåðèìåíòàëüíûì äàííûì ñ òî÷íîñòüþ (1:57 3:96) 10 5 ïî ïàðàìåòðó îòêëîíåíèÿ ", êîòîðûé â ñëó÷àå ïîäòâåðæäåíèÿ òåîðèè äîëæåí áûòü ðàâåí íóëþ, è â ýòîì ñëó÷àå çíà÷èìîé âåëè÷èíé ÿâëÿåòñÿ òîëüêî îøèáêà, ñ êîòîðîé ïîëó÷åíî ". Äàííûé ðåçóëüòàò óñòàíàâëèâàåò íîâûå îãðàíè÷åíèÿ äëÿ ìîäèôèöèðîâàííûõ òåîðèé ãðàâèòàöèè.

2. Ðàçðàáîòàííàÿ ìåòîäèêà îíëàéí ïîäàâëåíèÿ äîìèíèðóþùèõ ïîìåõ çà ñ÷åò ñìåíû ðåæèìîâ ñèíõðîíèçàöèè êîìóíèêàöèîííûõ ñèãíàëîâ ïî íàçåìíîìó è áîðòîâîìó ñòàíäàðòàì ÷àñòîòû ïîçâîëÿåò íà ïîðÿäîê ïîâûñèòü òî÷íîñòü èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîòû, òàêæå ìîæåò áûòü ïðèìåíåíà äëÿ ïîñëåäóþùèõ ïðåöèçèîííûõ ïðîâåðîê îá-ùåé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè.

3. Ðàçðàáîòàííàÿ è ðåàëèçîâàííàÿ ìåòîäèêà èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ðàäèîñèãíàëîâ âïåðâûå áûëà ïðèìåíåíà â óñëîâèÿõ îðáèòàëüíîãî ýêñïåðèìåíòà äëÿ ìàñøòàáîâ, ñðàâíèìûõ ñ ðàññòîÿíèåì äî Ëóíû, è óñòàíîâëèà íîâûå îãðàíè÷åíèÿ íà âîçìîæíûå îòêëîíåíèÿ îò ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè Ýéíøòåéíà â àñïåêòå îäíîðîäíîñòè ðåëÿòèâèñòñêîãî ïðîñòðàíñòâà-âðåìåíè.

4. Ðàçðàáîòàííå ïðîãðàìííå îáåñïå÷åíèå ñ èñïîëüçîâàíèåì áèáëèîòåê SOFA è astropy ïîçâîëèëî âûäåëèòü ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã ÷àñòîòû íà ôîíå ðåëÿòèâèñòñêîãî ýôôåêòà Äîïëåðà.

5. Ðàçðàáîòàííûé êîìïëåêñ ïðîãðàìì ïîçâîëÿåò ïðîàíàëèçèðîâàòü âêëàä àòìîñôåðíûõ ïîìåõ â ÷àñòîòó ñèãíàëà ¾ÐàäèîÀñòðîí¿. Êîìïåíñàöèÿ èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ÷àñòîòû íà îñíîâå ìîäåëè òîíêîé èîíîñôåðû è äàííûõ îá ýëåêòðîííîé ïëîòíîñòè ïîçâîëÿåò âûäåëèòü ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã íà ôîíå àòìîñôåðíûõ ýôôåêòîâ.

Ïóáëèêàöèè ïî òåìå äèññåðòàöèè

Ðåçóëüòàòû äèññåðòàöèîííîé ðàáîòû îïóáëèêîâàíû â 6 ñòàòüÿõ, èç íèõ â 5 ñòàòüÿõ â ðåöåíçèðóåìûõ íàó÷íûõ èçäàíèÿõ, èíäåêñèðóåìûõ â áàçå ÿäðà ÐÈÍÖ ¾eLibrary Science Index¿, ìåæäóíàðîäíûìè áàçàìè äàííûõ (Web of Science, Scopus, RSCI) è ðåêîìåíäîâàííûõ äëÿ çàùèòû â äèññåðòàöèîííîì ñîâåòå ÌÃÓ ïî ñïåöèàëüíîñòè 1.3.1. Ôèçèêà êîñìîñà, àñòðîíîìèÿ:

1. Litvinov D.A., Rudenko V.N., A.V. Belonenko , Filetkin A.I., Gusev A.V., Kulagin V.V., Porayko N.K., A.V.Alakoz, U.Bach, N.Bartel, K.G.Belousov M.Bietenholz, A.V.Biriukov, R.Carman, G.Cimo, D.Dirkx, C.Courde, A.I.Filetki D.A.Duev, G.Granato, L.I.Gurvits, R.Haas, G.Herold, A.Kahlon, B.Z.Kanevsk V.L.Kauts, G.D.Kopelyansky, G.Kronschnab, A.V.Kovalenko, A.M.Kutkin, M.Lindqvist, J.E.J.Lovell, H.Mariey, J.McCallum, G.Molera Calves, C.Moore, K.Moore, A.Neidhardt, C.Pbtz, S.V.Pogrebenko, A.Pollard, J.Quick, A.I.Smirn K.V.Sokolovsky, V.A.Stepanyants, J.Yang, J.-M.Torre, P.de Vicente, M.V.Zakl / Probing the gravitational RedShift with an earth-orbiting satellite // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. 2018. Vol. 382, no. 33. P. 2192 2198. EDN: YEHKYA. Èìïàêò-ôàêòîð 0.69 (JCI). Ëè÷íûé âêëàä 25%. Îáúåì 0.84 ïå÷àòíûõ ëèñòîâ.

2. Belonenko A. V. , Popov S. M., Rudenko V. N. Compensation of atmospheric hindrances in measuring the gravitational RedShift using satellites on-board clocks // Gravitation and Cosmology. 2020. Vol. 26, no. 2. P. 128 135. EDN: VRUSCN. Èìïàêò-ôàêòîð 0.25 (JCI). Ëè÷íûé âêëàä 90%. Îáúåì 0.96 ïå÷àòíûõ ëèñòîâ.

3. Belonenko A. V. , Gusev A. V., Rudenko V. N. / Precision measurement of gravitational frequency shift of radio signals using rao-cramer estimates

// Gravitation and Cosmology. 2021. Vol. 27, no. 4. P. 383 391. EDN: RUCZSW. Èìïàêò-ôàêòîð 0.25 (JCI). Ëè÷íûé âêëàä 75 %. Îáúåì 1.08 ïå÷àòíûõ ëèñòîâ.

4. N. V. Nunes, N. Bartel,A. V. Belonenko G. D. Manucharyan, S. M. Popov, V. N. Rudenko, L. I. Gurvits, G. Cimo, G. Molera Calves, M. V. Zakhvatkin / Gravitational RedShift test of eep from near earth to the distance of the moon with radioastron // Classical and Quantum Gravity. 2023. Vol. 40, no. 2. EDN: FRZLTM. Èìïàêò-ôàêòîð 0.93 (JCI). Ëè÷íûé âêëàä 25%. Îáúåì 2.4 ïå÷àòíûõ ëèñòîâ.

5. Ðóäåíêî Â.Í., Áåëîíåíêî À.Â. , Ãóñåâ À.Â., Ãóðèí Ô.Ñ., Êóëàãèí Â.Â., Ïîïîâ Ñ.Ì., Ìàíó÷àðÿí Ã.Ä., Çàõâàòêèí Ì.Â., Êîâàëåíêî À.Â. Ïðåöèçèîííîå èçìåðåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ýëåêòðî-ìàãíèòíûõ ñèãíàëîâ // Æóðíàë ýêñïåðèìåíòàëüíîé è òåîðåòè÷åñêîé ôèçèêè. - 2024. - Ò. 166. - •5. - C. 632-640. EDN: GUEJRO. Èìïàêò-ôàêòîð 1.31 (ÐÈÍÖ). Ëè÷íûé âêëàä 50 %. Îáúåì 1.08 ïå÷àòíûõ ëè-ñòîâ.

Èíûå ïóáëèêàöèè

6. Áåëîíåíêî À. Â. , Ðóäåíêî Â. Í., Ïîïîâ Ñ. Ì. Ïðåöèçèîííîå èçìå-ðåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ðàäèî÷àñòîò îêîëîçåìíûõ êîñìè÷å-ñêèõ àïïàðàòîâ // Àëüìàíàõ ñîâðåìåííé ìåòðîëîãèè. 2020. Ò. 24, • 4. Ñ. 27 31. EDN: HOSYUQ. Èìïàêò-ôàêòîð 0.213 (ÐÈÍÖ). Ëè÷íûé âêëàä 90%. Îáúåì 0.6 ïå÷àòíûõ ëèñòîâ.

Àïðîáàöèÿ ðåçóëüòàòîâ

Ðàáîòà áûëà ïðåäñòàâëåíà â äîêëàäàõ íà ñëåäóþùèõ êîíôåðåíöèÿõ:

1. 2020 Òåñòèðîâàíèå Ïðèíöèïà Ýêâèâàëåíòíîñòè ïî äàííûì êîñìè÷å-ñêîãî ýêñïåðèìåíòà ñî ñïóòíèêîì Ðàäèîàñòðîí (Óñòíûé) Àâòîðû: Áå-ëîíåíêî À.Â., Ãóñåâ À.Â., Ðóäåíêî Â.Í. 4-ÿ Ðîññèéñêàÿ êîíôåðåíöèÿ "Îñíîâàíèÿ ôóíäàìåíòàëüíîé ôèçèêè è ìàòåìàòèêè"(ÐÓÄÍ), Ìîñêâà, Ðîññèÿ, 11-12 äåêàáðÿ 2020

2. 2021 Einstein Equivalence Principle test with RadioAstron (Óñòíûé) Àâòîðû: Litvinov D.A., Rudenko V.N., Bartel N., Belonenko A.V., Gurvitz L.I., Nunes N., et al. 43rd COSPAR Scienti c assembly, 2021, Ñèäíåé, Àâñòðàëèÿ, 28 ÿíâàðÿ - 4 ôåâðàëÿ 2021 - 2020

3. 2021 Update on the gravitational RedShift measured with RadioAstron at distances up to 350,000 km from Earth (Óñòíûé) Àâòîðû: Nunes N.V., Bartel N., Belonenko A.V., Litvinov D.A., Rudenko V.N., Zakhvatkin M.V., et al. ïåðâàÿ âèðòóàëüíàÿ êîíôåðåíöèÿ CASC 2021, Canadian Association of Science Centres 100 Ramsey Lake Road Sudbury, ON. P3E 5S9, Êàíàäà, 1-3 èþíÿ 2021

4. 2021 Measurement of the gravitational RedShift e ect using the satellite Spectr-R in the "RadioAstron"mission (Óñòíûé) Àâòîðû: Áåëîíåíêî À.Â., Ðóäåíêî Â.Í., Ãóñåâ À.Â., Ïîïîâ Ñåðãåé Ìèõàéëîâè÷ Sixteenth Marcel Grossmann Meeting - MG16, Virtual Meeting, Èòàëèÿ, 5-10 èþëÿ 2021

5. 2021 Testing the principle of equivalence at a very large distance from the Earth according to the data of the Radioastron space experiment (Ñòåíäîâûé) Àâòîðû: Áåëîíåíêî À.Â., Ðóäåíêî Â.Í., Ãóñåâ À.Â., Ïîïîâ Ñ.Ì., Physical Interpretations of Relativity Theory - 2021, Ìîñêâà, Ðîññèÿ, 7 èþëÿ 2021

6. 2022 TESTING THE EINSTEIN EQUIVALENCE PRINCIPLE WITH RADIOASTRON (Óñòíûé) Àâòîðû: Nunes N., Bartel N., Belonenko A.V., Gusev A., Manucharyan G., Popov S., Rudenko V. 44th COSPAR Scienti c Assembly 2022, Athens, Ãðåöèÿ, 16-24 èþëÿ 2022

7. Measurements of the gravitational frequency shift of radio communication signals with RadioAstron satellite on a highly eccentric orbit (ñòåíäîâûé) Àâòîðû: A.V. Belonenko, A.V. Gusev, V.V. Kulagin, G. D. Manucharyan, S.M. Popov, V.N. Rudenko et al.; Rencontres de Moriond 2023, Gravitation, La Thuile, 18-25 March 2023

Ñòðóêòóðà è îáçîð äèññåðòàöèè

Äèññåðòàöèÿ ñîñòîèò èç ââåäåíèÿ, îñíîâíîé ÷àñòè, ñîäåðæàùåé òðè ãëàâû, è çàêëþ÷åíèÿ, à òàêæå ïðèëîæåíèÿ. Â äèññåðòàöèè 127 ñòðàíèöû, âêëþ÷àÿ 44 ðèñóíêà è 3 òàáëèöû.

Âî Ââåäåíèè ïðåäñòàâëåíî òåîðåòè÷åñêîå îáîñíîâàíèå àêòóàëüíîñòè òåìû äèññåðòàöèîííîãî èññëåäîâàíèÿ. Ñôîðìóëèðîâàíû öåëè è îñíîâíûå çàäà÷è ðàáîòû, ïîä÷åðêíóòû ýëåìåíòû íàó÷íîé íîâèçíû è ïðàêòè÷åñêîé çíà÷èìîñòè ïîëó÷åííûõ ðåçóëüòàòîâ. Èçëîæåíû îñíîâíûå ïîëîæåíèÿ, âûíåñèìûå íà çàùèòó. Îòäåëüíî óêàçàí ëè÷íûé âêëàä àâòîðà â ïðîâåäåííîå èññëåäîâàíèå, âêëþ÷àÿ ðàçðàáîòêó ìåòîäèê, àíàëèç äàííûõ è èíòåðïðåòàöèþ ðåçóëüòàòîâ. Ïðèâåäåí ïåðå÷åíü ïóáëèêàöèé ïî òåìå äèññåðòàöèè, à òàêæå ñïèñîê êîíôåðåíöèé, íà êîòîðûõ äîêëàäûâàëèñü ïðîìåæóòî÷íûå è èòîãîâûå ðåçóëüòàòû. Ñòðóêòóðà äèññåðòàöèè êðàòêî îïèñàíà ñ îáîñíîâàíèåì ëîãèêè èçëîæåíèÿ ìàòåðèàëà. Êðîìå òîãî, äàí îáçîð êëþ÷åâûõ ýêñïåðèìåíòàëüíûõ ðàáîò, âûïîëíåííûõ ðàíåå â äàííîé îáëàñòè.

Ãëàâà 1 ïîñâÿùåíà ðàçðàáîòêå ìåòîäà îíëàéí-êîìïåíñàöèè äîìèíèðóþùåãî äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà ïåðâîãî ïîðÿäêà, êîòîðûé ìàñêèðóåò ãðàâèòàöèîííîå ñìåùåíèå ÷àñòîòû â ýêñïåðèìåíòàõ ñ ÊÀ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿. Ïðåäñòàâëåí îáçîð òåõíè÷åñêèõ õàðàêòåðèñòèê ñïóòíèêà è ïðîâåäåí àíàëèç ñèñòåìàòè÷åñêèõ ïîãðåøíîñòåé, ñâÿçàííûõ ñ íåâîçìîæíîñòüþ îäíîâðåìåííîé ðàáîòû ðåæèìîâ îäíîïóòåâîé (1w, ÊÀ-ÍÑÑ) è äâóïóòåâîé (2w, ÍÑÑ-ÊÀ-ÍÑÑ) ïåðåäà÷è ñèãíàëà. Äåòàëüíî èçëàãàåòñÿ ïðèíöèï ðàáîòû êîìïåíñàöèîííîé ñõåìû äëÿ ýôôåêòà Äîïëåðà ïåðâîãî ïîðÿäêà, âêëþ÷àÿ ìàòåìàòè÷åñêîå îïèñàíèå ìåòîäà. Îñîáîå âíèìàíèå óäåëåíî ðàâíèòåëüíîìó àíàëèçó ðåæèìîâ ïåðåäà÷è ñèãíàëà (1w è 2w) è îöåíêå ïðääåëüíîé òî÷íîñòè èçìåðåíèé íà îñíîâå õàðàêòåðèñòèê áîðòîâîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû, ñ ïðèâåäåíèåì è èíòåðïðåòàöèåé ãðàôèêîâ äèñïåðñèè Àëëàíà. Îáñóæäàþòñÿ òåõíè÷åñêèå ñëîæíîñòè, âîçíèêàþùèå ïðè ðåàëèçàöèè îíëàéíêîìïåíñàöèè äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà. Â ðàçäåëå, ïîñâÿùåííîì êîìïåíñàöèè ýôôåêòîâ âòîðîãî ïîðÿäêà, ïðääñòàâëåíà ôîðìóëà äëÿ îñòàòî÷íîãî ñäâèãà ýôôåêòà Äîïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ïîñëå ïðèìåíåíèÿ êîìïåíñàöèîííîé ñõåìû è ìàòîä åãî ïîäàâëåíèÿ ñ èñïîëüçîâàíèåì áèáëèîòåê SOFA è astropy. Íàãëÿäíî äåìîíñòðèðóåòñÿ îòíîñèòåëüíûé âêëàä ðàçëè÷íûõ îñòàòî÷íûõ

ýôôåêòîâ ÷åðåç ñåðèþ ãðàôè÷åñêèõ çàâèñèìîñòåé. Ãëàâà âêëþ÷àåò ðàñøèðåííûé ñðàâíèòåëüíûé àíàëèç ðàíåå ïðîâåäåííûõ ýêñïåðèìåíòîâ ñ öåëüþ âûÿâëåíèÿ ôàêòîðîâ, îãðàíè÷èâàþùèõ òî÷íîñòü îïðåäåëåíèÿ ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ ". Çàâåðøàåòñÿ ãëàâà îïèñàíèåì íàçåìíûõ ýêñïåðèìåíòîâ ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà è ïåðñïåêòèâíûì ïëàíàìè áóäóùèõ êîñìè÷åñêèõ ìèññèé.

Ãëàâà 2 ïîñâÿùåíà êîìïëåêñíîìó àíàëèçó àòìîñôåðíûõ ýôôåêòîâ, îêàçûâàþùèõ âëèÿíèå íà ÷àñòîòó ïðèíèìàåìîãî ñèãíàëà íàçåìíîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ, à òàêæå èññëåäîâàíèþ ôëèêêåð-øóìà. Â ïåðâîé ÷àñòè ãëàâû ðàññìàòðèâàåòñÿ âëèÿíèå èîíîñôåðû, âêëþ÷àÿ äåòàëüíîå îïèñàíèå åå õàðàêòåðèñòèê è ñîñòàâà. Àíàëèçèðóþòñÿ ñóùåñòâóþùèå ìåòîäû êîìïåíñàöèè èîíîñôåðíûõ âîçìóùåíèé, ñðåäè êîòîðûõ îñîáîå âíèìàíèå óäåëåíî ìîäåëè îäíîñëîéíîé òîíêîé èîíîñôåðû, ãäå êëþ÷åâûìè ïàðàìåòðàìè âûñòóïàþò îïëîíå ýëåêòðîííîå ñîäåðæàíèå (TEC) è êàðòèðóþùàÿ ôóíêöèÿ. Ïðîâåäåíû ðàñ÷åòû èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ÷àñòîòû ñ èñïîëüçîâàíèåì ðàçëè÷íûõ èîíîñôåðíûõ êàðò, à òàêæå ðàññìîòðåí äâóõ÷àñòîòíûé ìåòîä êîìïåíñàöèè äàííîãî ýôôåêòà. Ñðàâíèòåëüíûé àíàëèç ýôôåêòèâíîñòè ìåòîäîâ êîìïåíñàöèè âûïîëíåí äëÿ êîñmè÷åñêîãî àïïàðàòà ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ è ñïóòíèêîâ ñèñòåìû GPS.

Âî âòîðîé ÷àñòè ãëàâû èññëåäóåòñÿ òðîïîñôåðíûé ñäâèã ÷àñòîòû ñèãíàëà. Äàíà îöåíêà âåëè÷èíû ýòîãî ýôôåêòà è ïðîàíàëèçèðîâàíû ðàçëè÷íûå ïîäõîäû ê åãî êîìïåíñàöèè. Ïðèâåäåíû ðåçóëüòàòû ðàñ÷åòîâ òðîïîñôåðíîãî ñäâèãà íà îñíîâå ìîäåëåé òðîïîñôåðíûõ çàäåðæåê, à òàêæå îòìå÷åíà ÷àñòîòíàÿ íåçàâèñèìîñòü äàííîãî ýôôåêòà â ðàáî÷åì äèàïàçîíå ÷àñòîò ¾ÐàäèîÀñòðîíà¿.

Â çàêëþ÷èòåëüíîì ðàçäåëå ãëàâû ïðåäñòàâëåíà îöåíêà âëèÿíèÿ ôëèêêåðøóìà íà òî÷íîñòü èçìåðåíèé è îáñóæäàþòñÿ âîçìîæíûå ìåòîäû åãî ó÷åòà â ðàìêàõ ïðîâîäèìîãî ýêñïåðèìåíòà.

Ãëàâà 3 ïðåäñòàâëÿåò îêîí÷àòåëüíûå ðåçóëüòàòû ýêñïåðèìåíòà ïî èçìåðåíèþ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ñ êîñmè÷åñêèì àïïàðàòîì ¾ÐàäèîÀñòðîí¿. Â íà÷àëå ãëàâû ðàññìàòðèâàåòñÿ ðàçðàáîòàííûé ìåòîä äåòåêòîðîâàíèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà, îñíîâàííûé íà ñïåêòðàëüíîì àëãîðèòìå ÷àñòîòíé îöåíêè. Äåòàëüíî ïîèñûâàåòñÿ ñõåìà ÷àñòîòíûõ ïðåîáðàçîâàíèé â âûñîêîèíôîðìàòèâíîì ðàäèîêîìïëåêñå (ÂÈÐÊ), ñîïîðîâæäàåìàÿ òåîðå-

òè÷åñêîé îöåíêîé ïðåäåëüíîé òî÷íîñòè èçìåðåíèé ñ èñïîëüçîâàíèåì èí-
ôîðìàöèîííîé ìàòðèöû Ôèøåðà è íåðàâåíñòâà Êðàìåðà-Ðàî.

Ýêñïåðèìåíòàëüíàÿ ÷àñòü âêëþ÷àåò äåìîíñòðàöèþ ïðàêòè÷åñêîãî ïðè-
ìåíåíèÿ àëãîðèòìà îñòàíîâêè ôàçû ñèãíàëà ñ ïîñëåäóþùèì îïðåäåëåíè-
åì ÷àñòîòû íà ÍÑÑ. Äëÿ îöåíêè ïîãðåøíîñòåé ïðîâåäåíî ìîäåëèðîâàíèå
ñèãíàëà ñ ïàðàìåòðàìè, ñîîòâåòñòâóþùèìè îðáèòàëüíîé äèíàìèêå ¾Ðàäèî-
Àñòðîíà¿, ïîäòâåðäèâøåå, ÷òî ïîãðåøíîñòü àëãîðèòìà äåòåêòèðîâàíèÿ íå
ïðåâûøàåò îøèáîê, âíîñèìûõ áîðòîâûì ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû.

Òåîðåòè÷åñêèé àíàëèç âêëþ÷àåò ðàñ÷¼ò ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà íà-
çåìíîé ñòàíöèè â ìîäåëè EGM2008, ñ êîëè÷åñòâåííûì ñîîîñòàâëåíèåì âêëà-
äà äóãèõ ýôôåêòîâ. Êëþ÷âûì ðåçóëüòàòîì ãëàâû ÿâëÿåòñÿ èòîãîâàÿ îöåí-
êà ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ ", ïîëó÷åííàÿ ïî ñîâîêóïíîñòè ýêñïåðèìåíòàëü-
íûõ ñåàíñîâ: "$_{opt}$ = (1 :57 3:96) 10 ^{5} ÷òî ñâèäåòåëüñòâóåò î çíà÷èòåëü-
íîì ïðîãðåññå äîñòèãíóòîé òî÷íîñòè èçìåðåíèé è èõ ñîîòâåòñòâèè òåîðåòè-
÷åñêèì ïðåäñêàçàíèÿì. Ïîëó÷åííûå äàííûå ïîâîäÿò èòîã êîìïëåêñíîì
èññëåäîâàíèþ è óñòàíàâëèâàþò íîâûå ãðàíèöû òî÷íîñòè â ýêñïåðèìåíòàëü-
íîé ïðîâåðêå ¾RedShift¿ ýôôåêòà â äàëüíåé çîíå çåìíîãî ãðàâèòàöèîííîãî
ïîëÿ íà ðàññòîÿíèÿõ, ñîîîñòàâèìûõ ñ äèñòàíöèåé äî Ëóíû.

Ãëàâà 1

Èçìåðåíèå ¾RedShift¿ ýôôåêòà ñ ¾online¿ êîìïåíñàöèåé äîìèíèðóþùèõ êèíåìàòè÷åñêèõ ïîìåõ

1.1 Êðàòêèé îáçîð ýêñïåðèìåíòîâ ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà

Ðàçðàáîòêà îáùåé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè (ÎÒÎ) Ýéíøòåéíîì îñíîâûâàëàñü íà ïðèíöèïå ýêâèâàëåíòíîñòè è òðåáîâàíèè ñîãëàñîâàííîñòè ñî ñïåöèàëüíîé òåîðèåé îòíîñèòåëüíîñòè. Òåîðèÿ ïîëó÷èëà ïîäòâåðæäåíèå ÷åðåç òðè êëàññè÷åñêèõ òåñòà:

1. Îáúÿñíåíèå àíîìàëüíîãî ñìåùåíèÿ ïåðèãåëèÿ Ìåðêóðèÿ (43^{00}=âåê), íåðàçðåøèìîãî â íüþòîíîâñêîé ìåõàíèêå. ÎÒÎ äàëà òî÷íîå ïðåäñêàçàíèå áåç ââåäåíèÿ ad hocãèïîòåç.
2. Ãðàâèòàöèîííîå îòêëîíåíèå ñâåòà, ïîäòâåðæä¼ííîå íàáëþäåíèÿìè âî âðåìÿ ñîëíå÷íûõ çàòìåíèé [39].
3. Ãðàâèòàöèîííîå êðàñíîå ñìåùåíèå, âåðèôèöèðîâàííîå â àñòðîôèçè÷åñêèõ íàáëþäåíèÿõ Àäàìñà, à çàòåì â ýêñïåðèìåíòå Ïàóíäà Ðåáêè (1960) [40].

Äàííàÿ ãëàâà îñíîâàíà íà ðàáîòàõ 1, 3, 4 èç ñïèñêà ïóáëèêàöèé ïî òåìå äèññåðòàöèè

1.2 Âîçìîæíûå ìåòîäû ïðîâåðêè ÏÝÝ ñ èñïîëüçîâàíèåì ¾RedShift¿ ýôôåêòà

Ñîãëàñíî îáùåé òåîðèè îòíîñèòåëüíîñòè Ýéíøòåéíà, ÷àñû, íàõîäÿùèåñÿ â òî÷êàõ ñ ðàçíûì ãðàâèòàöèîííûì ïîòåíöèàëàìè, èäóò ñ ðàçíîé ñêîðîñòüþ. Ýòî ÿâëåíèå èçâåñòíî êàê ãðàâèòàöèîííîå ñìåùåíèå èëè ¾RedShift¿ ýôôåêò. Âåëè÷èíà èçìåíåíèÿ ñêîðîñòè õîäà ÷àñîâ çàïèñûâàåòñÿ êàê:

$$\frac{T_{grav}}{T} = \frac{U}{c^2}; \qquad (1.1)$$

ãäå T - äëèòåëüíîñòü èíòåðâàëà âðåìåíè, èçìåðÿåìîãî ÷àñàìè â ëàáîðàòîðíîé ñèñòåìå, T_{grav} - ðàçíîñòü õîäà ÷àñîâ, U - ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ, c - ñêîðîñòü ñâåòà. Ñ òî÷êè çðåíèÿ ÷àñòîòû, ýôôåêò ¾RedShift¿ îçíà÷àåò, ÷òî ïðè èçëó÷åíèè ýëåêòðîìàãíèòíîé âîëíû â òî÷êå ñ ãðàâèòàöèîííûì ïîòåíöèàëîì U_1 è ïîñëåäóþùåì ïðè¼ìå â òî÷êå ñ ïîòåíöèàëîì U_2, å¼ ÷àñòîòà èçìåíÿåòñÿ íà âåëè÷èíó:

$$\frac{f_{grav}}{f} = \frac{U}{c^2}; \qquad (1.2)$$

ãäå $f_{grav}=f$ - èçìåðåííûé ÷àñòîòíûé ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã, U - ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ â òî÷êàõ ïîñûëêè è ïðèåìà ñèãíàëà, c - ñêîðîñòü ñâåòà.

Â ïîñòîÿííîì ãðàâèòàöèîííîì ïîëå, êîãäà êîìïîíåíòû ìåòðè÷åñêîãî òåíçîðà íå çàâèñÿò îò x^0, è ñ ó÷¼òîì ñâÿçè èñòèííîãî âðåìåíè ñ x^0, ïîëó÷àåì [41]:

$$! = p\frac{!_0}{g_{00}}; \qquad (1.3)$$

$$g_{00} = (1 \quad h_{00}) + O(c^{\ 4}); \qquad (1.4)$$

$$h_{00} = \frac{2GM}{rc^2} + O(c^{\ 4}); \qquad (1.5)$$

ãäå

- g_{00} âðåìåííàÿ êîìïîíåíòà ìåòðè÷åñêîãî òåíçîðà,
- h_{00} âîçìóùåíèå ìåòðèêè ïåðâîãî ïîðÿäêà,

ˆ r êîîðäèíàòà,

ˆ M ìàññà îáúåêòà,

ˆ ! ÷àñòîòà

ˆ c ñêîðîñòü ñâåòà,

ˆ O(c ^{4}) ÷ëåíû ÷åòâ¼ðòîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè ïî 1=c.

×àñòîòà êîëåáàíèé $!_0$, ïîíèìàåìàÿ êàê ÷èñëî êîëåáàíèé â åäèíèöó êî-îðäèíàòíîãî âðåìåíè $x^0=c$, íå èçìåíÿåòñÿ ïðè ðàñïðîñòðàíåíèè ýëåêòðî-ìàãíèòíîé âîëíû. Íàïðîòèâ, ! , èçìåðåííàÿ â ñîáñòâåííîì âðåìåíè, â ñèëó çàâèñèìîñòè g_{00} îò êîîðäèíàò áóäåò ðàçëè÷íîé â ðàçíûõ òî÷êàõ ïðîñòðàí-ñòâà.

Â ëèíåéíîì ïðèáëèæåíèè ñëàáîãî ñòàöèîíàðíîãî ãðàâèòàöèîííîãî ïî-ëÿ, õàðàêòåðèçóåìîãî íüþòîíîâñêèì ïîòåíöèàëîì ' (r), ïîëó÷àåì ñîîòíî-øåíèå:

$$! \quad ' \quad !_0 \quad 1 \quad \frac{' (r)}{c^2} \qquad (1.6)$$

Ñìåùåíèå ÷àñòîòû ÅÌ âîëíû ! ïðè ïåðåõîäå îò îäíîé òî÷êè ê äðóãîé ìîæíî ïîðåäåëèòü êàê:

$$! = !_2 \quad !_1 = !_0 \quad 1 \quad \frac{'_2}{c^2} \quad !_0 \quad 1 \quad \frac{'_1}{c^2} = !_0 \frac{'_1 \quad '_2}{c^2} \qquad (1.7)$$

Â ðàìêàõ ÎÒÎ ãðàâèòàöèîííûé ïîòåíöèàë ' îòðèöàòåëåí äëÿ ïðèòÿãèâà-þùèõ ìàññ, ïîýòîìó ìîæåì ïîðåäåëèòü:

ˆ äëÿ ñëó÷àÿ $'_{èñò} < '_{ïðè¼ì}$ (èçëó÷åíèå, ðàñïðîñòðàíÿþùååñÿ â îáëàñòü ñ ìåíüøèì àáñîëþòíûì çíà÷åíèåì ïîòåíöèàëà) íàáëþäàåòñÿ: óâåëè÷å-íèå ÷àñòîòû (! > $!_0$) ïðè ' > 0 (¾ãðàâèòàöèîííîå ñèíåå ñìåùåíèå¿),

ˆ óìåíüøåíèå ÷àñòîòû (! < $!_0$) ïðè ' < 0 (¾ãðàâèòàöèîííîå êðàñíîå ñìåùåíèå¿).

Â ëàáîðàòîðíûõ óñëîâèÿõ íà Çåìëå ñäâèã ÷àñòîòû íè÷òîæíî ìàë: ! 10 ^{16} Ãö ïðè âàðèàöèÿõ âûñîòû h = 1 ìåòð. Äëÿ òîãî, ÷òîáû èçìåðèòü òàêîé ìàëûé ñäâèã ÷àñòîòû â ëàáîðàòîðèè íà Çåìëå, òðåáóåòñÿ èñïîëüçî-âàíèå âûñîêîòî÷íîãî ñïåêòðîñêîïè÷åñêîãî îáîðóäîâàíèÿ. Ñàìûé ïåðâûé

Ðèñ. 1.1: Ãðàâèòàöèîííîå ñìåùåíèå ÷àñòîòû äëÿ ÷àñîâ, ðàñïîëîæåííûõ â ðàçëè÷íûõ ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëàõ

ýêñïåðèìåíò òàêîãî òèïà áûë ïðîâåäåí ïîñëå îòêðûòèÿ ýôôåêòà Ìåñáàóýðà â 1958 ãîäó Ïàóíäîì è Ðåáêîé (1960 ã.)[40]. Òî÷íîñòü ýòîãî ýêñïåðèìåíòà ñîñòàâèëà1% ïðè âàðèàöèÿõ âûñîòû ïîðÿäêà 30 ìåòðîâ. Â 2020 ãîäó ñ èñïîëüçîâàíèåì òîêèéñêîé òåëåáàøíè áûëè ïîëó÷åíû ðåçóëüòàòû èçìåðåíèÿ ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ: (1; 4 9; 1) 10^{-5} äëÿ h = 450 ìåòðîâ [42].

Ñëåäóþùèì ýòàïîì ïîâûøåíèÿ òî÷íîñòè ýêñïåðèìåíòàëüíûõ èññëåäîâàíèé ñòàëè ýêñïåðèìåíòû ñ áîëüøåé âàðèàöèåé ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà. Íàèáîëåå ïåðñïåêòèâíûì ìåòîäîì ðåàëèçàöèè òàêèõ èññëåäîâàíèé ÿâëÿþòñÿ êîñìè÷åñêèå ýêñïåðèìåíòû ñî ñïóòíèêàìè, îñíàù¼ííûìè âûñîêîòî÷íûìè ñòàíäàðòàìè ÷àñòîòû. Â óñëîâèÿõ îêîëîçåìíîãî ïðîñòðàíñòâà, ãäå ãðàâèòàöèîííûé ïîòåíöèàë Çåìëè ñóùåñòâåííî îòëè÷àåòñÿ îò ïîâåðõíîñòíîãî, òàêèå ýêñïåðèìåíòû ìîãëè áû îáåñïå÷èòü áîëåå òî÷íûå èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííûõ ýôôåêòîâ.

1.3 Ïîäðîáíûé àíàëèç ýêñïåðèìåíòà Gravity Probe A

Ðàçâèòèå àòîìíûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû ñòàëî ñòèìóëîì äëÿ ïðîâåäåíèÿ ýêñïåðèìåíòîâ ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà. Êàê âèäíî èç ôîðìóëû (1.2), äëÿ ìàêñèìèçàöèè âåëè÷èíû ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà íåîáõîäèìî ïîìåñòèòü ñòàíäàðòû ÷àñòîòû â òî÷êàõ ñ íàèáîëüøåé ðàçíîñòüþ ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ. Äëÿ ýòèõ öåëåé ëó÷øå âñåãî èñïîëüçîâàòü êîñìè÷åñêèå

àïïàðàòû. Èñòîðè÷åñêè ïåðâûì ýêñïåðèìåíòîì òàêîãî òèïà ñòàëà ìèññèÿ ¾Gravity-Probe A¿ (1976 ã.), â õîäå êîòîðîé Í-ñòàíäàðò áûë ïîäíÿò íà âûñîòó 10^4 êì áàëëèñòè÷åñêîé ðàêåòîé. Â àïïãåå òðàåêòîðèè, ãäå ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ áûëà ìàêñèìàëüíà, äàííûå ñî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû, ðàñïîëîæåííîãî íà ÊÀ, ñðàâíèâàëèñü ñ ïîêàçàíèÿìè àíàëîãè÷íîãî íàçåìíîãî ñòàíäàðòà. Èíôîðìàöèÿ î ÷àñòîòíûõ âàðèàöèÿõ ïåðåäàâàëàñü êîìóíèêàöèîííûìè ðàäèîñèãíàëàìè. Äëÿ ïðîâåðêè ¾RedShift¿ ýôôåêòà ââîäèëñÿ ñïåöèàëüíûé ïàðàìåòð íàðóøåíèÿ òåîðèè ", îøèáêà èçìåðåíèÿ êîòîðîãî ïîçâîëÿëà ñðàâíèòü ðåçóëüòàò ýêñïåðèìåíòà ñ ïðåäñêàçàíèÿìè ôîðìóëû ÎÒÎ:

$$\frac{f_{grav}}{f} = \frac{U}{c^2}(1 + ");\qquad (1.8)$$

ãäå f_{grav} - ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã ÷àñòîòû, f - íîìèíàëüíàÿ ÷àñòîòà ïîñûëêè ñèãíàëà ñ ÊÀ, U - ðàçíîñòü ãðàâèòàöèîííûõ ïîòåíöèàëîâ, c - ñêîðîñòü ñâåòà.

Ïàðàìåòð " èãðàåò êëþ÷åâóþ ðîëü â ýêñïåðèìåíòàõ ïî âûÿâëåíèþ ðàñõîæäåíèé ìåæäó ýêñïåðèìåíòàëüíûìè äàííûìè è ïðåäñêàçàíèÿìè ñóùåñòâóþùèõ òåîðèé ãðàâèòàöèè, à òàêæåñëóæèò êîëè÷åñòâåííîé îöåíêîé ñòåïåíè íåñîîòâåòñòâèÿ ìåæäó òåîðåòè÷åñêèìè ïðåäñêàçàíèÿìè è ðåàëüíûìè ãðàâèòàöèîííûìè ýôôåêòàìè. Â ÷àñòíîñòè, ïðè ïðîâåðêå ÎÒÎ ìîæíî óòâåðæäàòü î ñîãëàñîâàííîñòè òåîðèè è ýêñïåðèìåíòà, åñëè âåëè÷èíà" íå ïðåâûøàåò ïîãðåøíîñòü å¼ èçìåðåíèÿ. Ïàðàìåòð " ñëóæèò êëþ÷åâûì èíñòðóìåíòîì äëÿ ñîîîñòàâëåíèÿ ýêñïåðèìåíòàëüíûõ äàííûõ ñ òåîðåòè÷åñêèìè ïðåäñêàçàíèÿìè â ãðàâèòàöèè. Åãî àíàëèç ïîçâîëÿåò îöåíèòü ìåðó îòëè÷èÿ ïðåäëàãàåìûõ ìîäèôèöèðîâàííûõ ìîäåëåé ãðàâèòàöèè îò ÎÒÎ.

Äëÿ ïîâûøåíèÿ òî÷íîñòè îöåíêè " íåîáõîäèìî áûëî ó÷åñòü è êîìïåíñèðîâàòü âñå êîãåðåíòíûå ýôôåêòû, âåëè÷èíà êîòîðûõ ïî ïðÿäêó ñîîîñòàâèìà ñ òî÷íîñòüþ èñïîëüçóåìûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû èëè äàæå ïðåâûøàåò å¼. Äëÿ êîìïåíñàöèè ýôôåêòà ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû, âûçâàííîãî äîìèíèðóþùèì ýôôåêòîì Äîïëåðà ïåðâîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè, â ðàáîòå ¾Gravity Probe A¿ áûëà ðàçðàáîòàíà è ðåàëèçîâàíà êëþ÷åâàÿ ñõåìà åãî online êîìïåíñàöèè çà ñ÷åòîäíîâðåìåííûõ èçìåðåíèé â îáîèõ ðåæèìàõ ñèíõðîíèçàöèè îäíîïóòåâîì (1w) è äâóõïóòåâîì (2w) äàííûé ïîäõîä ïîçâîëèë ýôôåêòèâíî óñòðàíèòü äîïëåðîâñêîå ñìåùåíèå ïåðâîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè, îáåñïå-

÷èâ òî÷íîñòü êîìïåíñàöèè íà óðîâíå îãðàíè÷åíèÿ ñòàáèëüíîñòè ñòàíäàðòà ÷àñòîòû.

Ïîìèìî äîìèíèðóþùåãî ëèíåéíîãî äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà, ñèñòåìàòè÷åñêàÿ ïîãðåøíîñòü èçìåðåíèé îïðåäåëÿëàñü ñîâîêóïíîñòüþ ðåëÿòèâèñòñêèõ, ãðàâèìàòðè÷åñêèõ è ãåîòèçè÷åñêèõ ýôôåêòîâ. Èõ ñîãëàñîâàííûé ó÷åò òðåáîâàë ðàçðàáîòêè êîìïëåêñíîé ïîïðàâî÷íîé ìîäåëè, ó÷èòûâàþùåé âçàèìíîå âëèÿíèå ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ, ðåëÿòèâèñòñêèõ ïîïðàâîê âòîðîãî ïîðÿäêà, íåîäíîðîäíîñòåé ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ è âíåøíèõ ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîçìóùåíèé.

1. Ãðàâèòàöèîííîå ñìåùåíèå : òî÷íîå îïðåäåëåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîòû òðåáóåò ñîâìåñòíîãî ðàñ÷¼òà îðáèòàëüíûõ êîðäèíàò ÊÀ è ÍÑÑ, ïîñêîëüêó èõ ïðîñòðàíñòâåííîå ïîëîæåíèå íåïîñðåäñòâåííî îïðåäåëÿåò ëîêàëüíûå çíà÷åíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà.

2. Ýôôåêò Äîïëåðà âòîðîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè : õîòÿ ýòîò ýôôåêò ìåíåå çíà÷èì ïî ðàâíåíèþ ñ ýôôåêòîì ïåðâîãî ïîðÿäêà, îäíàêî îí ïðåâûøàåò ñîáñòâåííóþ ïîãðåøíîñòü ÷àñòîòíûõ ñòàíäàðòîâ. Â êîíå÷íîì ñ÷åòå åãî êîìïåíñàöèÿ îïðåäåëèëà òî÷íîñòü âñåãî ýêñïåðèìåíòà.

3. Àòìîñôåðíàÿ çàäåðæêà : òðîïîñôåðíûå è èîíîñôåðíûå ýôôåêòû ðàñïðîñòðàíåíèÿ ðàäèîñèãíàëîâ, îáóñëîâëåííûå âàðèàöèÿìè àòìîñôåðíûõ ïàðàìåòðîâ, âíîñÿò âêëàä â ñèñòåìàòè÷åñêóþ ïîãðåøíîñòü èçìåðåíèé.

4. Íåñôåðè÷íîñòü Çåìëè : Çåìëÿ íå ÿâëÿåòñÿ èäåàëüíîé ñôåðîé, å¼ ôîðìà èìååò îòêëîíåíèÿ, êîòîðûå âëèÿþò íà ãðàâèòàöèîííîå ïîëå è, ñîîòâåòñòâåííî, íà ÷àñòîòó ñèãíàëîâ. Ó÷¼ò ýòèõ íåñôåðè÷íûõ ýôôåêòîâ ïîçâîëÿåò òî÷íåå ïðåäñêàçûâàòü ãðàâèòàöèîííûé ïîòåíöèàë.

Êîìïëåêñíûé ó÷åò è êîððåêöèÿ ñèñòåìàòè÷åñêèõ ýôôåêòîâ ïîçâîëèëè ïîâûñèòü òî÷íîñòü ãðàâèòàöèîííûõ èçìåðåíèé íà ÷åòûðå ïîðÿäêà ïî ñðàâíåíèþ ñ êëàññè÷åñêèì ýêñïåðèìåíòàìè Ïàóíäà-Ðåáêè. Äëÿ ëó÷øåãî ïîíèìàíèÿ êîíöåïöèè ýêñïåðèìåíòà ïðèâåäåì êðàòêîå îïèñàíèå òåõíè÷åñêèõ ïàðàìåòðîâ êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà è ñòàíöèè ñëåæåíèÿ. Îñíîâíûå ýëåìåíòû ïîëåçíîé íàãðóçêè ÊÀ âêëþ÷àëè:

- âîäîðîäíûé ìàçåð , êàê âûñîêîñòàáèëüíûé êâàíòîâûé ãåíåðàòîð, îáåñïå÷èâàë ýòàëîíóþ ÷àñòîòó ñ îòíîñèòåëüíîé íåñòàáèëüíîñòüþ ïîðÿäêà 10 ^{14} íà èíòåðâàëå äëèòåëüíîñòè ýêñïåðèìåíòà,

- ôàçîâî-ñèíõðîíèçèðîâàííûé S-äèàïàçîííûé (2-4 ÃÃö) ïðåîáðàçîâàòåëü , ñîïðÿæåííûé ñ âîäîðîäíûì ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû, îáåñïå÷èâàë òðàíñëÿöèþ âûñîêîñòàáèëüíîãî ñèãíàëà äëÿ äàëüíåé êîñìè÷åñêîé ñâÿçè,
- ñïåöèàëèçèðîâàííûé S-äèàïàçîííûé ïðèåìïåðåäàò÷èê îñóùåñòâëÿë äâóñòîðîííèé îáìåí ðàäèîñèãíàëàìè ñ ñîõðàíåíèåì ìåòðîëîãè÷åñêèõ õàðàêòåðèñòèê.

Âñÿ ïîëåçíàÿ íàãðóçêà ìàññîé 57 êã áûëà ñòàáèëèçèðîâàíà âðàùåíèåì äëÿ ñîõðàíåíèÿ îðèåíòàöèè â èíåðöèàëüíîì ïðîñòðàíñòâå.

Ïðèíöèïèàëüíûì ýëåìåíòîì ýêñïåðèìåíòà ñòàëà ñèñòåìà àêòèâíîé êîìïåíñàöèè äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà â ðåàëüíîì âðåìåíè, îñíîâàííàÿ íà ïðèíöèïå êîãåðåíòíîé äâóõêàíàëüíîé ñèíõðîíèçàöèè. Ýòà ñèñòåìà ïîçâîëÿåò êîìïåíñèðîâàòü èçìåíåíèÿ ÷àñòîòû, âûçâàííûå äâèæåíèåì êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà (ÊÀ) îòíîñèòåëüíî íàçåìíîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ (ÍÑÑ). Êîìïåíñàöèîííàÿ ñõåìà, ðàçðàáîòàííàÿ äëÿ ðåàëèçàöèè ýòîé êîíöåïöèè, ñîñòîÿëà èç äâóõ êàíàëîâ ñâÿçè. Êàæäûé èç ýòèõ êàíàëîâ âûïîëíÿë ñïåöèôè÷åñêèå ôóíêöèè, íåîáõîäèìûå äëÿ ìèíèìèçàöèè äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà è îáñïå÷åíèÿ ñòàáèëüíîé ïðåäà÷è äàííûõ:

- Îäíîïóòåâîé êàíàë ñâÿçè (1w) îáåñïå÷èâàë ðåòðàíñëÿöèþ ñèãíàëà ñ áîðòîâîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû, íåñóùåãî â ñááå ñîâîêóïíûé ãðàâèòàöèîííûé è ðåëÿòèâèñòñêèé ÷àñòîòíûé ñäâèã, âêëþ÷àÿ âñå ñîïóòñòâóþùèå ñèñòåìàòè÷åñêèå ýôôåêòû.
- Äâóõïóòåâîé êàíàë ñâÿçè, ôóíêöèîíèðîâàâøèé ïî ïðèíöèïó ¾òóäàîáðàòíî¿ èëè ¾2w¿, áàçèðîâàëñÿ íà ôàçîâî-êîãåðåíòíîì ìèêðîâîëíîâîì ïðèåìïåðåäàò÷èêå, ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã ÷àñòîòû â íåì îòñóòñòâîâàë. Ýòîò êàíàë îáåñïå÷èâàë ïåðåäà÷ó äàííûõ äîïëåðîâñêîé ÷àñòîòû â îáîèõ íàïðàâëåíèÿõ, ïðåäñòàâëÿÿ ðàçíîñòíóþ ÷àñòîòó â âèäå f_0 f_{2w}.

Çàòåì òðåáîâàëîñü ðàçäåëèòü ýòó ðàçíîñòü íà äâà è âû÷åñòü å¼ èç ñèãíàëà ðàçíîñòíé ÷àñòîòû íèñõîäÿùåãî êàíàëà, êîòîðûé áûë ñäâèíóò íà f_0 f_{1w} èç-çà ýôôåêòîâ äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà ïåðâîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè è ðåëÿòèâèñòñêèõ ýôôåêòîâ, âêëþ÷àþùèõ äîïëåðîâñêèé ñäâèã âòîðîãî ïîðÿäêà ìà-

ëîñòè è ãðàâèòàöèîííîå êðàñíîå ñìåùåíèå (¾RedShift¿). Ïîñëå âû÷èòàíèÿ óäàëîñü óñòðàíèòü ýôôåêò äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà ïåðâîãî ïîðÿäêà, ÷òî ïîçâîëèëî âûäåëèòü ðåëÿòèâèñòñêèå ýôôåêòû äëÿ èõ ïîñëåäóþùåãî èçìåðåíèÿ. Äëÿ ýòîãî òðåáîâàëîñü ó÷åñòü è êîìïåíñèðîâàòü âëèÿíèå èîíîñôåðû. Ýòî áûëî äîñòèãíóòî ïóòåì òùàòåëüíîãî ïîäáîðà ñîîòíîøåíèé ÷àñòîò â ðåæèìàõ ¾1w¿ è ¾2w¿, ÷òî ïîçâîëèëî íèâåëèðîâàòü èîíîñôåðíûé ñäâèã ñ îòíîñèòåëüíîé òî÷íîñòüþ íå õóæå 5 10 ^{15}. Êðîìå òîãî, äëÿ îöåíêè âêëàäà øóìîâ ñòàíäàðòà ÷àñòîòû áûëà ïðîâåäåíà îöåíêà äèñïåðñèè Àëëàíà â àïîãåå òðàåêòîðèè ÊÀ.

Òî÷íîñòü ëþáîãî êîñìè÷åñêîãî òåñòà ïðèíöèïà ýêâèâàëåíòíîñòè ñóùåñòâåííî çàâèñèò îò òî÷íîãî îïðåäåëåíèÿ ïîëîæåíèÿ è ñêîðîñòè ÊÀ îòíîñèòåëüíî íàçåìíîé ñòàíöèè. Äëÿ äîñòèæåíèÿ âûñîêîé òî÷íîñòè êîìïåíñàöèè äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà âòîðîãî ïîðÿäêà è êîìïîíåíòîâ ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ íà óðîâíå 3 10 ^{15} íåîáõîäèìû ñëåäóþùèå ïàðàìåòðû:

- òî÷íîñòü ïîðåäåëåíèÿ ïîëîæåíèÿ: 100ì,
- òî÷íîñòü ïîðåäåëåíèÿ ñêîðîñòè: 6 ñì/ñ, âáëèçè àïîãåÿ òðàåêòîðèè ÊÀ.

Â ðàìêàõ ýêñïåðèìåíòà ¾Gravity Probe A¿ òî÷íîå ïîðåäåëåíèå êîîðäèíàò è ñêîðîñòè êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà ñòàëî êëþ÷åâûì ôàêòîðîì, îáåñïå÷èâøèì ôèíàëüíóþ òî÷íîñòü âñåãî èññëåäîâàíèÿ. Àâòîðû ïðåäñòàâèëè äâà çíà÷èìûõ ðåçóëüòàòà ñâîåé ðàáîòû: ïåðâûé ñ ðàçäåëåíèåì ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà îò ðåëÿòèâèñòñêîãî ýôôåêòà Äîïëåðà, âòîðîé äåìîíñòðèðóþùèé ñîâìåñòíûé ýôôåêò [43]. Âàæíî îòìåòèòü, ÷òî â èòîãîâîì ðåçóëüòàòå ñ ðàçäåëåíîì ýôôåêòîì íåäîñòàòî÷íàÿ òî÷íîñòü êîìïåíñàöèè ðåëÿòèâèñòñêîãî ýôôåêòà Äîïëåðà áûëà ðåøàþùèì ôàêòîðîì òî÷íîñòè èçìåðåíèÿ ".

1.4 GREAT

Â 2018 ãîäó çàâåðøèëñÿ êîñìè÷åñêèé ýêñïåðèìåíò ñ èñïîëüçîâàíèåì ñïóòíèêîâ ãëîáàëüíîé íàâèãàöèîííîé ñïóòíèêîâîé ñèñòåìû (ÃÍÑÑ) GALILEO. Ñïóòíèêè Galileo GSAT0201 è GSAT0202 áûëè çàïóùåíû íà ðàêåòå ¾Ñîþç¿ â àâãóñòå 2014 ãîäà, íî èç-çà òåõíè÷åñêîé ïðîáëåìû îêàçàëèñü íà íåêîð-

ðåêòíîé îðáèòå. Âìåñòî çàïëàíèðîâàííîé êðóãîâîé îðáèòû íîè îêàçàëèñü íà âûòÿíóòîé ýëëèïòè÷åñêîé îðáèòå.

Ïîñëå çàïóñêà Åâðîïåéñêîå êîñìè÷åñêîå àãåíòñòâî (ESA) ñòðåìèëîñü íàéòè ïîäõîäÿùóþ îðáèòó äëÿ âîññòàíîâëåíèÿ ðàáîòîñïîñîáíîñòè ñïóòíèêîâ. Áûëî ïðîâåäåíî â îáùåé ñëîæíîñòè 11 ìàíåâðîâ, ÷òîáû ñäåëàòü îðáèòó êðóãîâîé.

Â ðåçóëüòàòå, êîíå÷íàÿ îðáèòà äâóõ ñïóòíèêîâ âñå ðàâíî îñòàëàñü ýêñöåíòðè÷íîé (e = 0:1), ïîýòîìó èñïîëüçîâàòü èõ ïî ïðÿìîìó íàçíà÷åíèþ äëÿ íàâèãàöèîííûõ çàäà÷ áûëî íåëüçÿ. Ïðè ýòîì ñïóòíèêè, îáëàäàþùèå äîñòàòî÷íî áîëüøèì ýêñöåíòðèñèòåòîì, îêàçàëèñü õîðîøèìè êàíäèäàòàìè äëÿ ïðîâåðêè ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ. Ýëëèïòè÷åñêàÿ îðáèòà âûçûâàëà ïåðèîäè÷åñêóþ ìîäóëÿöèþ ñîáñòâåííîãî âðåìåíè ÷àñîâ ñ îðáèòàëüíîé ÷àñòîòîé.

Â õîäå ýêñïåðèìåíòàëüíîãî èññëåäîâàíèÿ áûë çàäåéñòâîâàí âîäîðîäíûé àòîìíûé ñòàíäàðò ÷àñòîòû, õàðàêòåðèçóþùèéñÿ âûñîêîé ñòàáèëüíîñòüþ. Íàçåìíûå èñïûòàíèÿ îòíîñèòåëüíîé ñòàáèëüíîñòè ÷àñòîòû äàííîãî ñòàíäàðòà âûÿâèëè ïðåîëàäàíèå ôëèêêåð-øóìà, óðîâåíü êîòîðîãî õàðàêòåðèçóåòñÿ äèñïåðñèåé Àëëàíà = 10 ^{14} (îòíîñèòåëüíàÿ ÷àñòîòà $\frac{f}{f}$) ïðè óñðåäíåíèè íà èíòåðâàëå âðåìåíè, ñîîòâåòñòâóþùåì îðáèòàëüíîìó ïåðèîäó T = 12;94 ÷àñà. Îòñóòñòâèå äîïëåðîâñêîé íåðåëÿòèâèñòñêîé ñõåìû (íàëè÷èå ðåæèìîâ 1w è 2w) êîìïåíñàöèè ïîðåáîâàëî âûñîêîòî÷íîãî âîññòàíîâëåíèÿ îðáèòû ñïóòíèêîâ. Íàëè÷èå îáøèðíîé ñåòè ëàçåðíîãî ñëåæåíèÿ çà ÃÍÑÑ ïîçâîëèëî àâòîðàì èññëåäîâàíèÿ èñïîëüçîâàòü ýòè äàííûå äëÿ êîìïåíñàöèè äîïëåðîâñêîãî ýôôåêòà ïåðâîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè.

Áëàãîäàðÿ òùàòåëüíîìó ìîäåëèðîâàíèþ ñèñòåìàòè÷åñêèõ ýôôåêòîâ è ïðîâîëæèòåëüíîìó íàêîïëåíèþ äàííûõ, àâòîðû ýêñïåðèìåíòà ñìîãëè äîñòè÷ü óðîâíÿ òî÷íîñòè èçìåðåíèÿ 3 10 ^{5} [44, 45]. Òî÷íîñòü èçìåðåíèé â äàííîì èññëåäîâàíèè íà ïîðÿäîê ïðåâîñõîäèò ðåçóëüòàòû, äîñòèãíóòûå â ðàìêàõ ìèññèè ¾Gravity Probe-A¿.

1.5 Ïðîåêòèðîâàíèå ãðàâèòàöèîííûõ èçìåðåíèé c ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿

ÊÐÒ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ óíèêàëüíûé àïïàðàò äëÿ ïðè¼ìà ñâåðõñëàáûõ ðàäèîñèãíàëîâ â ñàíòèìåòðîâîì è äåöèìåòðîâîì äèàïàçîíàõ. Ðàáîòàÿ êàê êîñìè÷åñêîå ïëå÷î èíòåðôåðîìåòðà, ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ äîñòèã ðåêîðäíîãî óãëîâîãî ðàçðåøåíèÿ, ïîçâîëèâøåãî èçó÷àòü ÷¼ðíûå äûðû, ïóëüñàðû è ìåæçâ¼çäíóþ ñðåäó. Áîðòîâîé êîìïëåêñ àïïàðàòóðû òåëåñêîïà ïðåäíàçíà÷åí äëÿ ðåøåíèÿ êëþ÷åâîé íàó÷íîé çàäà÷è: ìíîãî÷àñòîòíûé ïðè¼ì ðàäèîèçëó÷åíèÿ ñëàáûõ ðàäèîñèãíàëîâ è ìíîãîñòóïåí÷àòîå ïðîáàçîâàíèå ýòèõ ñèãíàëîâ ñ ïðåäåëüíî äîñòèæèìûìè ôàçîâûìè ñòàáèëüíîñòÿìè ê âèäåî÷àñòîòàì â ïîëîñå îò 0 äî 16 ÌÃö, îáåñïå÷èâàþùèì âûñîêîñêîðîñòíóþ ïåðåäà÷ó è ðåãèñòðàöèþ áîðòîâûõ äàííûõ íà Çåìëå. Çàïóñê ðàêåòû ¾Çåíèò-3Ô¿ ñ êîñìè÷åñêèì àïïàðàòîì ¾Ñïåêòð-Ð¿ ñîñòîÿëñÿ 18 èþëÿ 2011 ãîäà â 5 ÷àñîâ 31 ìèíóòó 17,91 ñåêóíäû ïî ìîñêîâñêîìó äåêðåòíîìó âðåìåíè ñ 45-é ïëîùàäêè êîñìîäðîìà ¾Áàéêîíóð¿. Àíòåííà êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà áûëà óñïåøíî ðàñêðûòà 23 èþëÿ 2011 ãîäà.

ÊÀ ¾Ñïåêòð-Ð¿ ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé 10-ìåòðîâûé ðåôëåêòîð, èíòåãðèðîâàííûé ñ ìíîãîäèàïàçîííûì ïðèåìíûì êîìïëåêñîì àïïàðàòóðû äëÿ ðàáîòû íà äëèíàõ âîëí 1.35, 6.2, 18 è 92 ñì. Äëÿ óñòàíîâêè âñåãî àíòåííîàïïàðàòóðíîãî êîìïëåêñà ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ íà êîñìè÷åñêîì àïïàðàòå ¾Ñïåêòð-Ð¿ èñïîëüçóåòñÿ áàçîâàÿ êîñìè÷åñêàÿ ïëàòôîðìà ¾Íàâèãàòîð¿. Êîìïîíîâêà êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà (ÊÐÒ) è àïïàðàòóðíîãî êîìïëåêñà íà ìîäóëå ¾Íàâèãàòîð¿ ïîêàçàíà íà ðèñ. 1.2

Ðèñ. 1.2: Êîìïîíåíòà êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà íà áàçîâîì ìîäóëå ¾Íàâèãàòîð¿

1.5.1 Ïàðàìåòðû öåëåâîé îðáèòû

Öåëåâàÿ îðáèòà õàðàêòåðèçóåòñÿ ñëåäóþùèìè ïàðàìåòðàìè:

- âûñîòà ïåðèãåÿ h_p = 577 êì,
- âûñîòà àïîãåÿ h_a = 336 863 êì,
- íàêëîíåíèå îðáèòû i = 51:6 .

Ýòè ïàðàìåòðû îïðåäåëÿò ôîðìó è îðèåíòàöèþ îðáèòû êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà â ïðîñòðàíñòâå.

Íà÷àëüíûé ýòàï ëåòíûõ èñïûòàíèé ÊÐÒ â 2011 ãîäó õàðàêòåðèçîâàëñÿ ñëåäóþùèìè êëþ÷åâûìè ñîáûòèÿìè: â ïåðèîä ñ ñåðåäèíû ñåíòÿáðÿ 2011 ãî-äà îñóùåñòâëåíî ïåðâîå óñïåøíîå âêëþ÷åíèå ðàäèîàñòðîíîìè÷åñêèõ ïðè-åìíèêîâ, ïîñëå ÷åãî íà÷àëñÿ ýòàï ïëàíîâûõ èñïûòàíèé áîðòîâîãî íàó÷íîãî îáîðóäîâàíèÿ. Íà÷èíàÿ ñ 27 ñåíòÿáðÿ, ïðèñòóïèëè ê ïðîâåäåíèþ ðàäèîìåò-ðè÷åñêèõ èçìåðåíèé õàðàêòåðèñòèê êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà, â õîäå

Ðèñ. 1.3: Îðáèòà ÊÀ ïîëíîãî öèêëà. Êðàñíûì öâåòîì ïîêàçàíà îðáèòà ÊÀ, ðàçðûâû â äàííûõ ñâÿçàíû ñ îòñóòñòâèåì ðåêîíñòðóêòîâàííîé îðáèòû â ýòè ïåðèîäû. Çåëåíûì öâåòîì ïîêàçàíî äâèæåíèå ÍÑÑ (âðàùåíèå Çåìëè) çà âðåìÿ ïîëíîãî öèêëà ÊÀ íà îðáèòå

êîòîðûõ âûïîëíÿëèñü íàáëþäåíèÿ ðàçëè÷íûõ àñòðîíîìè÷åñêèõ îáúåêòîâ â àâòîíîìíî ðåæèìå ðàáîòû (áåç îðàçîâàíèÿ èíòåðôåðîìåòðè÷åñêîé áàçû ñ íàçåìíûìè òåëåñêîïàìè).

Ðàçðàáîòêà áîðòîâîãî íàó÷íîãî êîìïëåêñà ÊÐÒ âåëàñü ñ 1985 ãîäà ñîâìåñòíûìè óñèëèÿìè ðîññèéñêèõ è ìåæäóíàðîäíûõ îðãàíèçàöèé. Ïðîâêò ðåàëèçîâûâàëñÿ â ñîîòâåòñòâèè ñ åäèíûìè òåõíè÷åñêèìè òðåáîâàíèÿìè ê íàó÷íîé àïïàðàòóðå êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà ¾Ñïåêòð-Ð¿ è ñïåöèôè÷åñêèìè òåõíè÷åñêèìè çàäàíèÿìè äëÿ êàæäîãî íàó÷íîãî ïðèáîðà. Íàó÷íîå ðóêîâîäñòâî ïðîåêòîì ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ îñóùåñòâëÿë àñòðîôèçè÷åñêèé îòäåë ÈÊÈ ÀÍ ÑÑÑÐ (ñ 1990 ãîäà - Àñòðîêîñìè÷åñêèé öåíòð ÔÈÀÍ) [46]. Ñîçäàíèå êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà áûëî âûïîëíåíî ñïåöèàëèñòàìè ÍÍÎ èìåíè Ñ.À. Ëàâî÷êèíà.

1.6 Àïïàðàòíîòåõíè÷åñêèé êîìïëåêñ ìèññèè ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ â ãðàâèòàöèîííîì ýêñïåðèìåíòå

Íàó÷íûé êîìïëåêñ êîñìè÷åñêîãî ðàäèîòåëåñêîïà ñîñòîèò èç ñëåäóþùèõ ïðèáîðîâ è áëîêîâ, ðàñïîëîæåííûõ â ñîîòâåòñòâóþùèõ ìîäóëÿõ:

Ôîêàëüíûé ìîäóëü

Â òåðìîñòàáèëèçèðîâàííîì îõëàæäàåìîì ôîêàëüíîì óçëå íàõîäÿòñÿ:

- Áëîê ñîîñíûõ àíòåííûõ îáëó÷àòåëåé íà ðàäèîàñòðîííîì÷åñêèå äèàïàçîíû 1.35, 6.2, 18 è 92 ñì äëÿ ëåâîé è ïðàâîé êðóãîâûõ ïîëÿðèçàöèé.
- Áëîêè ìàëîøóìÿùèõ óñèëèòåëåé (ÌØÓ), âûíåñåííûå èç ïðèåìíèêîâ äèàïàçîíîâ 1.35, 6.2 è 18 ñì.

Ôîêàëüíûé êîíòåéíåð

Â îõëàæäàåìîì ãåðìåòè÷íîì ôîêàëüíîì êîíòåéíåðå ðàçìåùåíû:

- Íàó÷íûå ïðèáîðêè óêàçàííûõ ÷åòûðåõ äèàïàçîíîâ (îâîçíà÷åíû ÏÐÌ íà ðèñóíêå 1.2) ñ îòäåëüíûìè èñòî÷íèêàìè âòîðè÷íîãî ýëåêòðîïèòàíèÿ äëÿ îáåèõ ïîëÿðèçàöèé ïðèíèìàåìîãî ðàäèîèçëó÷åíèÿ.
- ÌØÓ äèàïàçîíà 92 ñì íàõîäèòñÿ âíóòðè ñîîòâåòñòâóþùåãî ïðèåìíèêà, êîòîðûé îáúåäèíåí ñ áëîêîì èìïóëüñíîé ôàçîâîé êàëèáðîâêè äëÿ âñåõ äèàïàçîíîâ.
- Ñåëåêòîð Ï×, êîìóòèðóþùèé âûõîäíûå ñèãíàëû ïðèåìíèêîâ íà ïðîìåæóòî÷íîé ÷àñòîòå (Ï×) íà ñîîòâåòñòâóþùèå âõîäû ïðåîáðàçîâàòåëåé ÷àñòîòû ôîðìàòîðà (áëîê Ï-ÊÐÒ-Ïð) äëÿ äàëüíåéøèõ ïðåîáðàçîâàíèé ñèãíàëîâ ê áîëåå íèçêèì ÷àñòîòàì.
- ×àñòîòíûé ôîðìèðîâàòåëü ÃÑÂ×, ñîñòîÿùèé èç äâóõ áëîêîâ ôîðìèðîâàòåëÿ ãåòåðîäèíûõ ñâåðõâûñîêèõ ÷àñòîò (ÔÃÑÂ×-1 è ÔÃÑÂ×-2) ñ èñòî÷íèêàìè âòîðè÷íîãî ýëåêòðîïèòàíèÿ (ÈÂÝÏ ÔÃÑÂ×).
- Çàäóáëèðîâàííûé áëîê óïðàâëåíèÿ è àíàëèçà ñîñòîÿíèé (ÁÓÀÑ-Ô) áëîêîì êîìóòàöèè ïèòàíèÿ (ÁÊÏ-Ô).

Ïðèáîðíûé ìîäóëü

Â ïðèáîðíîì ìîäóëå óñòàíîâëåíû:

- Äâà áîðòîâûõ âîäîðîäíûõ ñòàíäàðòà ÷àñòîòû (ÁÂÑ);
- Â òåðìîñòàáèëèçèðîâàííîì ãåðìåòè÷íîì íàó÷íîì êîíòåéíåðå ðàçìåùåíû äâà áîðòîâûõ ðóáèäèåâûõ ñòàíäàðòà ÷àñòîòû (ÁÐÑ, Rb-ñòàíäàðò íà ðèñóíêå 2), ÷àñòîòíûé ôîðìèðîâàòåëü ÃÒ× ñî ñäâîåííûì áëîêîì ôîðìèðîâàòåëÿ ãåòåðîäèííûõ è òàêòîâûõ ÷àñòîò (ÔÃÒ) è äâóìÿ èñòî÷íèêàìè ïèòàíèÿ (ÈÂÝÏ ÔÃÒ) äëÿ íèõ.
- Äâà àíàëîãî-öèôðîâûõ ïðåîáðàçîâàòåëÿ ñèãíàëîâ áëîêà Ï-ÊÐÒ-Ïð (Ôîðìàòîð).
- Çàäóáëèðîâàííûé áëîê óïðàâëåíèÿ è àíàëèçà ñîñòîÿíèé íàó÷íîãî êîíòåéíåðà (ÁÓÀÑ-Ï) ñ áëîêàìè ïèòàíèÿ.

Ðèñ. 1.4: Ñõåìà ñîäèíåíèÿ ïðèáîðîâ äëÿ êàëèáðîâêè êàíàëà 15 ÃÃö

Äëÿ óñïåøíîãî ðåøåíèÿ çàäà÷è âñå ïðèáîðû ëèíèè ¾áîðòîâîé ïðè¼ìíèê ! ïðåîáðàçîâàòåëü ÷àñòîò! áîðòîâîé ïåðåäàò÷èê ! íàçåìíàÿ ñòàíöèÿ ïðè¼ìà¿ äîëæíû ðàáîòàòü áåçóïðå÷íî. Ïîòåðÿ ñèãíàëà èëè ôàçîâîé ñòàáèëüíîñòè â îäíîì èç ýëåìåíòîâ ïðèâåä¼ò ê ïîòåðå èíôîðìàöèè è äîðîãîãî íàáëþäàòåëüíîãî âðåìåíè äëÿ ðàäèîòåëåñêîïîâ íàçåìíî-êîñìè÷åñêîãî ðàäèîèíòåðôåðîìåòðà. Ïî ýòîé ïðè÷èíå â áîðòîâîé íàó÷íûé êîìïëåêñ ââåäåíû àïïàðàòóðíûå äóáëèðîâàíèå áëîêîâ è ïðèáîðîâ è ôóíêöèîíàëüíàÿ èç-

Ðèñ. 1.5: Ñõåìà ñîåäèíåíèÿ ïðèáîðîâ äëÿ îäíîâðåìåííé çàïèñè ñèãíàëîâ 8.4 è 15 ÃÃö

áûòî÷íîñòü, ÷òî ïîçâîëèëî êîìïîíîâàòü ýòó ïîñëåäîâàòåëüíóþ ëèíèþ èç áîëüøîãî ÷èñëà ñî÷åòàíèé ïðèáîðîâ è áëîêîâ. Âñ¼ ýòî ñóùåñòâåííî ïîâûñèëî íàä¼æíîñòü ðàáîòû êîìïëåêñà â öåëîì. Ïîëæèòåëüíûé ýôôåêò òàêîãî ïîäõîäà ñêàçàëñÿ óæå íà ýòàïå ë¼òíûõ èñïûòàíèé ÊÐÒ. Òàê, èç äâóõ óñòàíîâëåííûõ íà áîðòó è èñïûòàííûõ â ïîë¼òå âîäîðîäíûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû òîëüêî îäèí îêàçàëñÿ ñîîòâåòñòâóþùèì ïðîåêòíûì òðåáîâàíèÿì.

Áîðòîâûå ñòàíäàðòû ÷àñòîòû

Â ðàäèîíòåðôåðîìåòðèè ñî ñâåðõäëèííûìè áàçàìè êëþ÷åâóþ ðîëü èãðàåò ñòàáèëüíîñòü ÷àñòîòû (ôàçû), îïðåäåëÿåìàÿ ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû, ñèãíàë êîòîðîãî èñïîëüçóåòñÿ â êà÷åñòâå ïåðâè÷íîãî îñöèëëÿòîðà äëÿ ïîñëåäîâàòåëüíûõ ÷àñòîòíûõ ïðåîáðàçîâàíèé. Áëàãîäàðÿ íàëè÷èþ òàêîãî ñòàíäàðòà ìîæíî áûëî ïðîâîäèòü ïðåöèçèîííûå ýêñïåðèìåíòû ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà.

Ôóíêöèîíèðîâàíèå ÊÐÒ ïðåäóñìàòðèâàåò ðàáîòó ñ îïîðíûì ñèãíàëàìè îò òð¼õ èñòî÷íèêîâ:

- Áîðòîâîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû ÁÂÑ× (5 ÌÃö èëè 15 ÌÃö).
- Ñèãíàëà 15 ÌÃö ïåòëè ôàçîâîé ñèíõðîíèçàöèè ÏÔÑ ÂÈÐÊ, ñèíõðîíèçèðîâàííîãî c ñèãíàëîì íàçåìíîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû íà ñòàíöèè ñëåæåíèÿ.
- Áîðòîâîãî ðóáèäèåâîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû ÁÐÑ× (5 ÌÃö).

ÁÂÑ× ÊÐÒ ïåðâûé â ìèðå áîðòîâîé àêòèâíûé âîäîðîäíûé ñòàíäàðò ÷àñòîòû íà îêîëîçåìíîé îðáèòå, óñïåøíî ó÷àñòâóþùèé â ðåàëèçàöèè îðáèòàëüíîé ïðîãðàììû áîëåå ãîäà. Åãî ñîçäàíèå â ÇÀÎ ¾Âðåìÿ-×¿ âêëþ÷àëî ðåøåíèå ñïåöèàëüíûõ çàäà÷:

- Âàêóóìèðîâàíèå òåðìîñòàòîâ çà ñ÷¼ò êîñìè÷åñêîãî âàêóóìà.
- Óñèëåíèå ìåõàíè÷åñêîé ñòîéêîñòè êîíñòðóêöèè ðåçîíàòîðà è íàêîïèòåëüíîé êîëáû äëÿ æ¼ñòêèõ óñëîâèé âûâîäà íà îðáèòó.
- Òåìïåðàòóðíàÿ ñòàáèëèçàöèÿ ñòàíäàðòà ñ ïîìîùüþ ñèñòåìû îáåñïå÷åíèÿ òåìïåðàòóðíîãî ðåæèìà è òåïëîèçîëÿöèè êîíñòðóêöèè.
- Ïðîâåäåíèå íàçåìíûõ èñïûòàíèé â óñëîâèÿõ êîñìè÷åñêîãî âàêóóìà.
- Ðåøåíèå òåõíîëîãè÷åñêèõ ïðîáëåì, ñâÿçàííûõ ñ ýêñïëóàòàöèåé â êîñìè÷åñêîì âàêóóìå.

Ðèñ. 1.6: Íåñòàáèëüíîñòü ÷àñòîòû (ñðåäíåêâàäðàòè÷åñêîå îòíîñèòåëüíîå äâóõâûáîðî÷íîå îòêëîíåíèå ÷àñòîòû âûõîäíîãî ñèãíàëà 5 ÌÃö) ïðè èçìåíåíèè òåìïåðàòóðû îêðóæàþùåé ñðåäû â ïðåäåëàõ 1 C â ðàáî÷åì äèàïàçîíå òåìïåðàòóð è ñêîðîñòè èçìåíåíèÿ òåìïåðàòóðû íå áîëåå 0;3 C/÷àñ

Âûñîêîòî÷íûé ðàäèîëèíèÿ ¾ÊÐÒ Çåìëÿ¿

Â ñîñòàâ âûñîêîòî÷íûõ ðàäèîëèíèè âõîäÿò áîðòîâîé êîìïëåêñ ÂÈÐÊ è íàçåìíàÿ ñòàíöèÿ ñëåæåíèÿ è ñáîðà íàó÷íîé èíôîðìàöèè, ñîçäàííàÿ íà

áàçå ðàäèîòåëåñêîïà ÐÒ-22 ÔÈÀÍ Ïóùèíñêîé ðàäèîàñòðîíîìè÷åñêîé îá-ñåðâàòîðèè èì. Â.Â. Âèòêåâè÷à ÀÊÖ ÔÈÀÍ (ã. Ïóùèíî, Ìîñêîâñêàÿ îá-ëàñòü).

Áîðòîâîé êîìïëåêñ ÂÈÐÊ

Âûñîêèíôîðìàòèâíûé ðàäèîêàíàë è áîðòîâîé êîìïëåêñ ÂÈÐÊ ïðåäíà-çíà÷åíû äëÿ ïåðåäà÷è âûñîêîñêîðîñòíé âèäåîèíôîðìàöèè îò êîñìè÷åñêî-ãî ðàäèîòåëåñêîïà íà íàçåìíóþ ñòàíöèþ ñëåæåíèÿ è äëÿ ñèíõðîíèçàöèè áîðòîâîé îïîðíé ÷àñòîòû ñèãíàëîì îò íàçåìíîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà â îäíîì èç ðåæèìîâ ðàáîòû ÊÐÒ è ÂÈÐÊ.

Êîìïëåêñ ÂÈÐÊ ìîæåò ôóíêöèîíèðîâàòü â îäíîì èç äâóõ ðåæèìîâ:

- ¾ÊÎÃÅÐÅÍÒ¿ èëè 2w :

  Ñèíõðîíèçàöèÿ áîðòîâîãî îïîðíîãî ñèãíàëà íà ÷àñòîòå 15 ÌÃö äëÿ ñèñòåìû ôîðìèðîâàíèÿ ÷àñòîò ÊÐÒ .

  Ñèíõðîíèçàöèÿ ñèãíàëîâ ïåðåäàò÷èêîâ ÂÈÐÊ íà ÷àñòîòàõ 8.4 ÃÃö (îòùíîñòüþ 2 Âò) è 15 ÃÃö (ìîùíîñòüþ 40 Âò) îò íàçåìíîé ñòàíöèè íà îñíîâå íàçåìíîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû è ïåðåäàâàåìûì íà áîðò ñ íàçåìíîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ.

- ¾Í-ìàçåð¿ èëè 1w :

  Ñèíõðîíèçàöèÿ ñèãíàëîâ ïåðåäàò÷èêîâ ÂÈÐÊ îñóùåñòâëÿåòñÿ íà ÷àñòîòå 15 ÌÃö îò áîðòîâîãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà ÷àñòîòû.

  Âîçìîæíà ðàáîòà êîìïëåêñà ÂÈÐÊ ñ ïîíèæåííûì óðîâíåì èçëó÷åíèÿ ìîùíîñòè ïåðåäàò÷èêà (4 Âò) íà ÷àñòîòå 15 ÃÃö.

Ýòîò êîìïëåêñ îáåñïå÷èâàåò íàäåæíóþ è ñòàáèëüíóþ ïåðåäà÷ó äàííûõ, íåîáõîäèìóþ äëÿ ðàáîòû ÊÐÒ, â ðàçëè÷íûõ ðåæèìàõ ðàáîòû.

Â ñîñòàâ ÂÈÐÊ âõîäÿò àíòåííî-ôèäåðíàÿ ñèñòåìà è áîðòîâîé ðàäèîòåõ-íè÷åñêèé êîìïëåêñ:

Áîðòîâîé ðàäèîòåõíè÷åñêèé êîìïëåêñ ÂÈÐÊ

Áîðòîâîé ðàäèîòåõíè÷åñêèé êîìïëåêñ ÂÈÐÊ ñîäåðæèò:

- ïðè¼ìîòâåò÷èê ïåòëè ôàçîâîé ñèíõðîíèçàöèè íà ÷àñòîòó 7.2/8.4 ÃÃö,

ˆ ðàäèîïåðåäàþùåå óñòðîéñòâî ÐÏÄÓ-15 íà ÷àñòîòó 15 ÃÃö.

Íàçåìíàÿ ñòàíöèÿ ñëåæåíèÿ è ñáîðà íàó÷íîé èíôîðìàöèè ÿâëÿåòñÿ ÷àñòüþ âûñîêîèíôîðìàòèâíîé ðàäèîëèíèè ¾ÊÐÒ Çåìëÿ¿ â ïðîåêòå ¾Ðàäèî-Àñòðîí¿. Ñòðóêòóðíàÿ ñõåìà ñòàíöèè ïðèâåäåíà íà ðèñ. 1.7.

Ðèñ. 1.7: Ñòðóêòóðíàÿ ñõåìà íàçåìíîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ â Ïóùèíî

Àíòåííî-ôèäåðíàÿ ñèñòåìà

Àíòåííî-ôèäåðíàÿ ñèñòåìà âêëþ÷àåò â ñåáÿ:

- äâóõçåðêàëüíóþ ïðè¼ìî-ïåðåäàþùàÿ îñòðîíàïðàâëåííàÿ àíòåííà äèàìåòðîì 1.5 ì,
- âðàùàþùåñÿ âîëíîâîäíîå ñî÷ëåíåíèå, ñîåäèí¼ííîå ñ ïðèâîäîì ýòîé àíòåííû,
- âîëíîâîäíûé òðàêò è ôèëüòðû.

Ñòàíöèÿ ïðåäíàçíà÷åíà äëÿ:

1. Íàâåäåíèÿ íàçåìíîãî ðàäèîòåëåñêîïà ÐÒ-22 ÔÈÀÍ íà ÊÐÒ è ñëåæåíèÿ çà íèì â òå÷åíèå ñåàíñà ñâÿçè.
2. Ïðè¼ìà è ðåãèñòðàöèè ïîòîêà íàó÷íûõ è ñëóæåáíûõ äàííûõ ñ áîðòà êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà.
3. Ïåðåäà÷è íà áîðò àïïàðàòà ôàçîñòàáèëüíîãî îïîðíîãî ñèãíàëà, ñèíõðîíèçèðîâàííîãî íàçåìíûì âîäîðîäíûì ñòàíäàðòîì ÷àñòîòû (¾Í-ìàçåðîì¿ ñòàíöèè ñëåæåíèÿ).
4. Ïðè¼ìà êîãåðåíòíî ïðåîáðàçîâàííîãî íà áîðòó êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà îòâåòíîãî ñèãíàëà, èçìåðåíèÿ òåêóùåé ÷àñòîòû îñòàòî÷íîãî äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà è òåêóùåé ðàçíîñòè ôàç îòâåòíîãî è çàïðîñíîãî ñèãíàëà, ðåãèñòðàöèè ýòèõ èçìåðåíèé ñ ïðèâÿçêîé ê òåêóùåìó âðåìåíè.
5. Ïðè¼ìà âíåøíèõ äàííûõ, íåîáõîäèìûõ äëÿ ðàáîòû íàçåííé ñòàíöèè, è âûäà÷è îòðåáåòåëÿì èíôîðìàöèè î ñîñòîÿíèè íàçåííé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ è ñáîðà äàííûõ.

Â ñîñòàâ íàçåííé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ âõîäÿò:

- Àíòåííà ðàäèîòåëåñêîïà ÐÒ-22 ÔÈÀÍ, ñèñòåìà íàâåäåíèÿ, îáëó÷àòåëü è àíòåííî-ôèäåðíûå òðàêòû íà äèàïàçîíû ÷àñòîò 15, 8.4 è 7.2 ÃÃö.
- Ïðè¼ìî-ïåðåäàþùàÿ ñèñòåìà ôàçîâîé ñèíõðîíèçàöèè â äèàïàçîíàõ ÷àñòîò 7.2 è 8.4 ÃÃö.

- Ñèñòåìà ïðè¼ìà íàó÷íûõ è ñëóæåáíûõ äàííûõ â äèàïàçîíå 15 ÃÃö.
- Ñèñòåìà èçìåðåíèÿ îñòàòî÷íîãî äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà è âàðèàöèè ôàçû ñèãíàëîâ ÂÈÐÊ.
- Ñèñòåìà ðåãèñòðàöèè íàó÷íûõ è ñëóæåáíûõ äàííûõ.
- Ñèñòåìà îïîðíûõ ÷àñòîò, ñëóæáà âðåìåíè è ìåòåîñòàíöèÿ.
- Óïðàâëÿþùèé êîìïüþòåð è ïðîãðàììíîå îáåñïå÷åíèå ñòàíöèè.
- Àïïàðàòóðà êîíòðîëÿ ðàáîòîñïîñîáíîñòè ñòàíöèè.
- Àïïàðàòóðà âíåøíåé ñâÿçè è ðàñïðåäåëèòåëüíàÿ êàáåëüíàÿ ñåòü.

Ïðîâåäåíû èçìåðåíèÿ ýôôåêòèâíîé ïëîùàäè àíòåííû ÐÒ-22 ñ àíòåííîôèäåðíîé ñèñòåìîé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ è øóìîâîé òåìïåðàòóðû ïðè¼ìíîé ñèñòåìû. Èçìåðåíàÿ âåëè÷èíà ýôôåêòèâíîé ïëîùàäè ÐÒ-22 íà ÷àñòîòå 15 ÃÃö ñîñòàâèëà 170^{2}ì Øóìîâàÿ òåìïåðàòóðà ïðè¼ìíîé ñèñòåìû íà ÷àñòîòàõ 8.4 è 15 ÃÃö ñîñòàâèëà îêîëî 100 Ê.

1.7 ×åðåäîâàíèå ðåæèìîâ: óñòðàíåíèå Äîïëåðîâñêîãî ñäâèãà ÷àñòîòû 1-ãî ïîðÿäêà

Íåðåëÿòèâèñòñêèé ýôôåêò Äîïëåðà ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé îäèí èç êëþ÷åâûõ ôàêòîðîâ, âëèÿþùèõ íà ñäâèã ÷àñòîòû ðàäèîñèãíàëîâ â ñïóòíèêîâûõ ýêñïåðèìåíòàõ. Ýòîò ýôôåêò îáóñëîâëåí îòíîñèòåëüíûì äâèæåíèåì èñòî÷íèêà ñèãíàëà (ÊÀ) è ñòàíöèè ñëåæåíèÿ, ðàñïîëîæåííîé íà Çåìëå. Äëÿ ïðîâåäåíèÿ ïðåöèçèîííûõ èçìåðåíèé, òàêèõ êàê îïðåäåëåíèå ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû èëè èññëåäîâàíèå ðåëÿòèâèñòñêèõ ýôôåêòîâ, íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü è êîìïåíñèðîâàòü âëèÿíèå ýôôåêòà Äîïëåðà. Îñíîâíûì ìåòîäîì êîìïåíñàöèè ÿâëÿåòñÿ èñïîëüçîâàíèå äàííûõ î ðàäèàëüíîé ñêîðîñòè êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà, ÷òî ïîçâîëÿåò ìèíèìèçèðîâàòü èñêàæåíèÿ, âûçâàííûå îòíîñèòåëüíûì äâèæåíèåì.

Â ýêñïåðèìåíòå ñ èñïîëüçîâàíèåì ñïóòíèêîâ Galileo íåðåëÿòèâèñòñêèé ýôôåêò Äîïëåðà êîìïåíñèðîâàëñÿ ñ âûñîêîé òî÷íîñòüþ áëàãîäàðÿ ïðèíåíåíèþ äâóõ êëþ÷åâûõ ìåòîäîâ:

- Ñåòü ñòàöèîíàðíûõ ÃÍÑÑ ñòàíöèé ñëåæåíèÿ : îáåñïå÷èâàëè íåïðåðûâíûé ìîíèòîðèíã ïîëîæåíèÿ è ñêîðîñòè ñïóòíèêîâ, ÷òî ïîçâîëÿëî òî÷íî îïðåäåëÿòü ðàäèàëüíóþ ñêîðîñòü ÊÀ.
- Ìåòîä ëàçåðíé äàëüíîìåòðèè : ëàçåðíûå èçìåðåíèÿ ðàññòîÿíèÿ äî ñïóòíèêîâ îáåñïå÷èâàëè äîïîëíèòåëüíûå ïîïðàâêè â îïðåäåëåíèè èõ òðàåêòîðèé.

Òàêîé ïîäõîä ïîçâîëèë äîñòè÷ü òî÷íîñòè êîìïåíñàöèè ýôôåêòà Äîïëåðà, äîñòàòî÷íîé äëÿ èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîò ñ îòíîñèòåëüíîé ïîãðåøíîñòüþ íå õóæå 3 10 ^{5}.

Ýêñïåðèìåíò ñ êîñìè÷åñêèì ðàäèîòåëåñêîïîì ¾ÐàäèÀñòðîí¿ ïðåäúÿâëÿåò áîëåå ñòðîãèå òðåáîâàíèÿ ê òî÷íîñòè êîìïåíñàöèè ýôôåêòà Äîïëåðà. Äëÿ äîñòèæåíèÿ òî÷íîñòè ëó÷øå 10 ^{4}, íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü ýôôåêò Äîïëåðà ñ òî÷íîñòüþ, ñîîòâåòñòâóþùåé ðàäèàëüíîé ñêîðîñòè ÊÀ ïîðÿäêà 1 ìêì/ñ. Îäíàêî ìåòîäû îöåíêè ðàäèàëüíîé ñêîðîñòè ñïóòíèêà ÐàäèÀñòðîí îáåñïå÷èâàëè òî÷íîñòü ëèøü íà óðîâíå 3 ìì/ñ, ÷òî íà òðè ïîðÿäêà õóæå òðåáóåìîãî çíà÷åíèÿ.

Äëÿ êîìïåíñàöèè ýôôåêòà Äîïëåðà áåç ïðèâëå÷åíèÿ äàííûõ î ñêîðîñòè ÊÀ, íà ýòàïå ïîäãîòîâêè ïðîãðàìì ãðàâèòàöèîííûõ ñåàíñîâ áûëà ðàçðàáîòàíà ñõåìà ÷åðåäîâàíèÿ äâóõ ðåæèìîâ ðàáîòû âûñîêîíôîðìàòèâíîãî ðàäèîêàíàëà (ÂÈÐÊ) [15].

Ðàçðàáîòàííàÿ ñõåìà áûëà ïîõîæà íà ñõåìó, ðåàëèçîâàííóþ â ýêñïåðèìåíòå ¾Gravity Probe A¿, è áàçèðîâàëàñü íà äâóõ ðåæèìàõ ñâÿçè: ¾1w¿ è ¾2w¿. Â ðåæèìå 1w (îäíîíóòåâàÿ ëèíèÿ ¾ÊÀ - ÍÑÑ¿, ñèíõðîíèçèðîâàííàÿ ïî áîðòîâîìó ñòàíäàðòó ÷àñòîòû), ïðèíÿòûé ñèãíàë íà ÍÑÑ èìåë ñìåùåíèå ÷àñòîòû:

$$\frac{f_{1w}}{f_{íîìèíàë}} = \frac{D_{-}}{c} + \frac{U}{c^2} + \frac{j\nu_e - \nu_s j^2}{2c^2} + \frac{D_{-}\alpha_s}{c^2} + \frac{f_{òðîïî}}{f_{íîìèíàë}} + \frac{f_{èîíî}}{f^2_{íîìèíàë}} + \frac{f_{3rd}}{f_{íîìèíàë}} \qquad (1.9)$$

ãäå D_{-} ñêîðîñòü èçìåíåíèÿ âåëè÷èíû âåêòîðà äàëüíîñòè D_{-}, ν_e - âåêòîð ñêîðîñòè ÍÑÑ, ν_s - âåêòîð ñêîðîñòè ÊÀ, $\frac{f_{òðîïî}}{f_{íîìèíàë}}$ - îòíîñèòåëüíûé òðîïîñôåðíûé ñäâèã, $\frac{f_{èîíî}}{f^2}$ - îòíîñèòåëüíûé èîíîñôåðíûé ñäâèã, α_s óñêîðåíèå êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà, $\frac{f_{3rd}}{f_{nominal}}$ âêëþ÷àåò ýôôåêòû òðåòüãîãî ïîðÿäêà ìàëîñòè, â òîì ÷èñëå ýôôåêò äâèæåíèÿ ôàçîâîãî öåíòðà.

Â ðåæèìå ¾2w¿ (äâóõïóòåâàÿ ëèíèÿ ¾ÍÑÑ - ÊÀ - ÍÑÑ¿, ñèíõðîíèçèðîâàííàÿ ïî íàçåìíîì ñòàíäàðòó ÷àñòîòû) ôîðìóëà äëÿ ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà èìåëà âèä:

$$\frac{f_{2w}}{f_{íîìèíàë}} = 2\frac{D}{c} + 2\frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{2c^2} + 2\frac{D \quad a_s}{c^2} \qquad (1.10)$$

$$2\frac{D \quad a_e}{c^2} + 2\frac{f_{òðîïî}}{f_{íîìèíàë}} + \frac{f_{2w;èîíî}}{f^2} + \frac{f_{2w;3rd}}{f_{íîìèíàë}}$$

ãäå a_e óñêîðåíèå íàçåìíé ñòàíöèè ñëåæåíèÿ, $\frac{f_{2w;èîíî}}{f^2}$ - îòíîñèòåëüíûé èîíîñôåðíûé ñäâèã â ðåæèìå 2w, êîòîðûé íå ðàâåí èîíîñôåðíîì ñäâèãó â ðåæèìå 1w è $\frac{f_{2w;3rd}}{f_{íîìèíàë}}$ ìàëûå ýôôåêòû, àíàëîãè÷íûå 1.9. Âñå îñòàëüíûå îáîçíà÷åíèÿ ñîâïàäàþò ñ ôîðìóëîé 1.9.

Îñîáåííîñòü ðàññìàòðèâàåìîãî ðåæèìà çàêëþ÷àåòñÿ â òîì, ÷òî ñèãíàë ¾2w¿ íå ñîäåðæèò ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà ÷àñòîòû, êîòîðûé ÿâëÿåòñÿ êëþ÷åâûì îáúåêòîì èññëåäîâàíèÿ. Îäíàêî ¾2w¿ ñèãíàë ïîäâåðãàåòñÿ óäâîåííîì äîïëåðîâñêîì è òðîïîñôåðíîì ñäâèãó ÷àñòîòû ïî ñðàâíåíèþ ñ ñèãíàëîì ¾1w¿, à òàêæå ñîäåðæèò óäâîåííûå âêëàäû øóìîâ ñðåäû ðàñïðîñòðàíåíèÿ è ðÿäà èíñòðóìåíòàëüíûõ ýôôåêòîâ.

Êîìïëåêñíàÿ îáðàáîòêà äàííûõ ¾1w¿ è ¾2w¿ ïîçâîëÿåò ýôôåêòèâíî êîìïåíñèðîâàòü óêàçàííûå ýôôåêòû. Â ÷àñòíîñòè:

- Äîïëåðîâñêèé ñäâèã : óäâîåííûé äîïëåðîâñêèé ñäâèã â ñèãíàëå ¾2w¿ ìîæåò áûòü âû÷òåí èç äàííûõ ¾1w¿, ÷òî ïîçâîëÿåò óñòðàíèòü åãî âëèÿíèå.
- Òðîïîñôåðíûé ñäâèã : àíàëîãè÷íûì îáðàçîì êîìïåíñèðóåòñÿ òðîïîñôåðíûé ñäâèã, êîòîðûé òàêæå óäâàèâàåòñÿ â ñèãíàëå ¾2w¿.

Êîìïåíñàöèîííàÿ ñõåìà ñ èñïîëüçîâàíèåì ¾1w¿ è ¾2w¿ ðåæèìîâ ñâÿçè äàåò:

$$\frac{f_{1w}}{f_{íîìèíàë}} \quad \frac{1}{2}\frac{f_{2w}}{f_{íîìèíàë}} = \frac{U}{c^2} \quad \frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{2c^2} + \frac{D \quad a_e}{c^2} + \frac{f_{èîíî}}{f^2} + \frac{f_{3rd}}{f_{íîìèíàë}} \qquad (1.11)$$

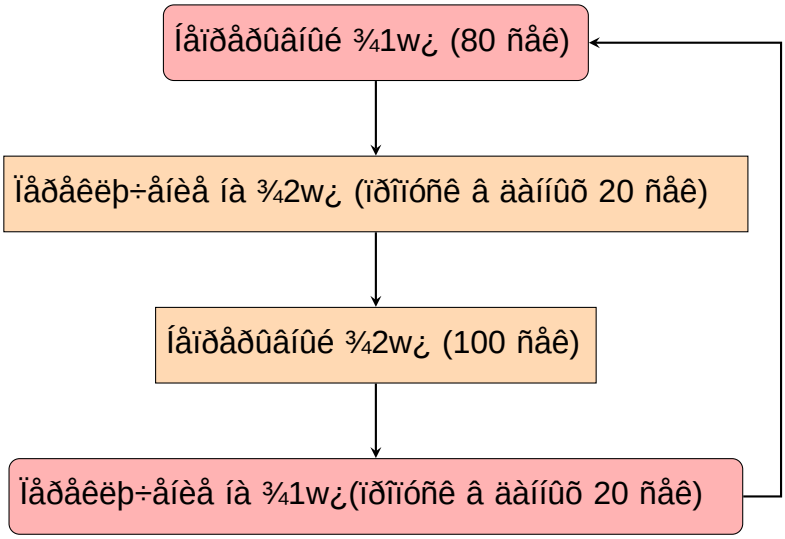
Âî âòîðîì è òðåòüåì ñëàãàåìîì ó÷èòûâàåòñÿ îñòàòî÷íûé ýôôåêò Äîïïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ïîñëå ïðèìåíåíèÿ êîìïåíñàöèîííîé ñõåìû, â ïîñëåäíåì ñëàãàåìîì ó÷èòûâàþòñÿ îñòàòî÷íûå ýôôåêòû, òàêèå êàê âëèÿíèå îñòà-

òî÷íîãî âêëàäà òðîïîñôåðû, îñòàòî÷íûé âêëàä èîíîñôåðû, äâèæåíèå ôàçîâîãî öåíòðà àíòåííû, à òàêæå âêëàä ýôôåêòà Äîïëåðà òðåòüåãî ïîðÿäêà ìàëîñòè. Äëÿ äîñòèæåíèÿ çàïëàíèðîâàííé òî÷íîñòè ýêñïåðèìåíòà íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü îòíîñèòåëüíûå ñäâèãè ÷àñòîòû, ïðåâûøàþùèå âåëè÷èíó 10^{14}, âêëþ÷àÿ íåêîòîðûå ñëàãàåìûå òðåòüåãî ïîðÿäêà ïî $\frac{v}{c}$:

$$\frac{f_{3rd}}{f_{nominal}} = \frac{D}{c^3}(D\dot{\gamma}_e + (\forall_e - \forall_s)\,a_s + r\,U_s - \forall_s)$$
$$\frac{D}{c^3}D\dot{\gamma}\,a_e + \frac{D}{c^3}(2(\forall_e - \forall_s)\,a_e + r\,U_e - \forall_e) \qquad (1.12)$$
$$\frac{D}{c^3}[\,U - \frac{1}{2}j\forall_e - \forall_s j^2] + O(v=c)^4$$

ãäå$\dot{\gamma}_e$ ÷ëåí, ïîèñûâàþùèé íåðàâíîìåðíîñòü âðàùåíèÿ ÍÑÑ.

Â îòëè÷èå îò ýêñïåðèìåíòà ¾Gravity Probe-A¿, â ìèññèè ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ îäíîâðåìåííàÿ ïåðåäà÷à äàííûõ â ðåæèìàõ ¾1w¿ è ¾2w¿ áûëà íåâîçìîæíà èç-çà àïïàðàòíûõ îãðàíè÷åíèé ÊÀ. ×òîáû èñïîëüçîâàòü ïðèìóùåñòâà îáîèõ ðåæèìîâ ðàáîòû, áûëà ðàçðàáîòàíà è ðåàëèçîâàíà ñëåäóþùàÿ ñõåìà ïðîâåäåíèÿ ãðàâèòàöèîííûõ ñàíñîâ:



Ðèñ. 1.8: Ïðèíöèïèàëüíàÿ áëîê-ñõåìà ïðîâåäåíèÿ ãðàâèòàöèîííûõ ñàíñîâ. Ïîñëå çàâåðøåíèÿ îäíîé èòåðàöèè ïðîöåññ ïîâòîðÿëñÿ. Âñåãî âûïîëíÿëîñü 10 èòåðàöèé, ÷òî ïîçâîëÿëî íàêîïèòü äîñòàòî÷íîå êîëè÷åñòâî äàííûõ.

1.8 Êðàåâûå ýôôåêòû â öåïî÷êå èçìåðèòåëüíûõ èí-òåðâàëîâ

Â ïðîöåññå ôîðìèðîâàíèÿ ñèãíàëà íà ÊÀ áîðòîâîé êîìïåêñ ñâÿçè âû-ïîëíÿåò ïîñëåäîâàòåëüíîñòü ïðåîáðàçîâàíèé, âêëþ÷àÿ ïåðåêëþ÷åíèÿ ìåæäó ñòàíäàðòàìè ÷àñòîòû, ãåòåðîäèíèðîâàíèå è äóãèå òåõíè÷åñêèå îïåðàöèè. Äàííûå ïðåîáðàçîâàíèÿ, íåñìîòðÿ íà ñîîòâåòñòâèå ðåãëàìåíòèðîâàí-íîé öèêëîãðàììå, ïðèâîäÿò ê êðàòêîâðåìåííîé íåñòàáèëüíîñòè ñèãíàëà â íà÷àëüíûé ìîìåíò ïðèåìà íà ÍÑÑ. Íàáëþäàåìûå èñêàæåíèÿ ïðîÿâëÿþò-ñÿ â ïåðâûå ñåêóíäû ïîñëå àêòèâàöèè êàæäîãî èç ðåæèìîâ ðàáîòû, ÷òî îáóñëîâëåíî ïåðåõîäíûìè ïðîöåññàìè â àïïàðàòíîì òðàêòå, âêëþ÷àÿ óñòà-íîâëåíèå ÷àñòîòû è ôàçû. Íà ðèñóíêå 1.9 âèçóàëüíî âèäíû âûáðîñû, îáú-ÿñíÿåìûå ïîòåðåé çàõâàòà ñèãíàëà.

Ðèñ. 1.9: Ïðèìåð çàïèñè ñèãíàëà ñ ïåðåêëþ÷åíèÿìè. Âûïàäàþùèå òî÷êè âûçâàíû êðà-ââûìè ýôôåêòàìè âî âðåìÿ ñìåíû ðåæèìà ðàáîòû ÂÈÐÊ.

Äëÿ ìèíèìèçàöèè âëèÿíèÿ çàøóìëåííûõ ó÷àñòêîâ íà ïîñëåäóþùóþ îá-ðàáîòêó ïðèìåíÿëñÿ àâòîìàòèçèðîâàííûé àëãîðèòì èñêëþ÷åíèÿ ôðàãìåí-òîâ ñ íèçêèì îòíîøåíèåì ñèãíàë-øóì (SNR), à òàêæå êðèòåðèé 3 [16]. Îä-íàêî â îòäåëüíûõ ñåàíñàõ ñâÿçè òðåáîâàëîñü äîïîëíèòåëüíîå ðó÷íîå ìàñêè-ðîâàíèå äàííûõ, ïîñêîëüêó àâòîìàòè÷åñêèå ìåòîäû íå âñåãäà îáåñïå÷èâàëè äîñòàòî÷íóþ òî÷íîñòü èäåíòèôèêàöèè ïîëåçíîãî ñèãíàëà íà ôîíå ïåðåõîä-íûõ ïðîöåññîâ. Óäàëåíèå íåñòàáèëüíûõ ó÷àñòêîâ ïðèâîäèëî ê ñîêðàùåíèþ

îáùåé äëèòåëüíîñòè àíàëèçèðóåìîãî ñèãíàëà íà 7 12 ñåêóíä, ÷òî â ðÿäå ñëó÷àåâ îêàçûâàëî âëèÿíèå íà òî÷íîñòü îöåíêè ÷àñòîòû, îñîáåííî â óñëî-âèÿõ îãðàíè÷åííîãî âðåìåíè ñåàíñà.

1.9 Ïðîáëåìû, ñîïóòñòâóþùèå online êîìïåíñàöèè äî-ïëåðîâñêîãî ñäâèãà 1-ãî ïîðÿäêà

Íà ñõåìå (íà ðèñ. 1.10) ðåæèìîâ ðàáîòû â ¾1w¿ è ¾2w¿ ëèíèè êðàòêî ïðåä-ñòàâëåíû îñíîâíûå ýòàïû ïðîáðàçîâàíèÿ ÷àñòîò âîñõîäÿùåé è íèñõîäÿùåé ëèíèé ñâÿçè. Â ðåæèìå 2w ñèãíàë ïîñûëàåòñÿ íà ÊÀ ñ ÷àñòîòîé 7.2 ÃÃö, à çàòåì ïðåîáðàçîâûâàåòñÿ íà 8.4 è 15 ÃÃö. Êîìïåíñàöèîííàÿ ñõåìà òðåáóåò ó÷åòà âðåìåíè ðàñïðîñòðàíåíèÿ ñèãíàëà â ¾2w¿ ðåæèìå äî ÊÀ îò ÍÑÑ è îò ÊÀ íà ÍÑÑ. Çà âðåìÿ t ñòàíöèÿ ñîâåðøàåò ïîâîðîò è ñèãíàë, êîòîðûé âåðíóëñÿ ñ ÊÀ ïðèõîäèò â äðóãóþ òî÷êó. Äëÿ ýòîãî ââåäåì ðÿä îáîçíà÷åíèé íà ðèñ. 1.11.

Ðèñ. 1.10: Ñõåìà ðåæèìà ðàáîòû â ¾1w¿ è ¾2w¿ ëèíèè. H-maser - âîäîðîäíûé ñòàíäàðò ÷àñòîòû

Ïåðåäà÷à ñèãíàëà ñ ÊÀ íà ÍÑÑ ïðîèñõîäèò íå ìãíîâåííî, à ñ çàäåðæêîé, ñâÿçàííîé ñ âðåìåíåì ðàñïðîñòðàíåíèÿ ñèãíàëà. Äëÿ ó÷åòà ýòîé çàäåðæêè ðàññìîòðèì òðè êëþ÷åâûõ ñîáûòèÿ, ñâÿçàííûõ ñ ïåðåäà÷åé ñèãíàëîâ ìåæäó ÍÑÑ è ÊÀ:

1. Ïîñûëêà ñèãíàëà ôàçîâîé ñèíõðîíèçàöèè âîñõîäÿùåé ëèíèè :
   - Ìîìåíò âðåìåíè: t_1 (îáîçíà÷åí êàê ñîáûòèå 1).
   - Äåéñòâèå: íàçåìíàÿ ñòàíöèÿ îòïðàâëÿåò ñèãíàë ôàçîâîé ñèíõðîíèçàöèè ïî âîñõîäÿùåé ëèíèè ñâÿçè.
2. Ïðèåì ñèãíàëà âîñõîäÿùåé ëèíèè è ïîñûëêà ñèãíàëà íèñõîäÿùåé ëèíèè :
   - Ìîìåíò âðåìåíè: t_2 (îáîçíà÷åí êàê ñîáûòèå 2).
   - Äåéñòâèå: ÊÀ ïðèíèìàåò ñèãíàë âîñõîäÿùåé ëèíèè è ¾îäíîâðåìåííî¿ îòïðàâëÿåò ñèãíàë íèñõîäÿùåé ëèíèè.
3. Ïðèåì ñèãíàëà íèñõîäÿùåé ëèíèè íà íàçåìíîé ñòàíöèè :
   - Ìîìåíò âðåìåíè: t_3 (îáîçíà÷åí êàê ñîáûòèå 3).
   - Äåéñòâèå: ÍÑÑ ïðèíèìàåò ñèãíàë íèñõîäÿùåé ëèíèè.

Ðèñ. 1.11: Âåêòîðà-ñîñòîÿíèÿ â ìîìåíòû ïîñûëêè, ðåòðàíñëÿöèè è ïðèåìà ñèãíàëà

Îïðåäåëåíèå âåêòîðîâ ñîñòîÿíèÿ

Âåêòîð äàëüíîñòè Ð ïîðåäåëÿåòñÿ êàê ðàçíîñòü âåêòîðîâ ïîëîæåíèÿ êîñ-ìè÷åñêîãî àïïàðàòà r_s è íàçåìíîé ñòàíöèè r_e â ìîìåíò âðåìåíè t_3:

$$Ð = r_s - r_e = Ðñ;$$

ãäåÐ ðàññòîÿíèå ìåæäó àïïàðàòîì è ñòàíöèåé, à ñ åäèíè÷íûé âåêòîð íàïðàâëåíèÿ.

Âñå îñòàëüíûå âåêòîðû ñîñòîÿíèÿ òàêæå ïîðåäåëÿþòñÿ â ìîìåíò âðåìåíè t_3, ÷òî ïîçâîëÿåò ñèíõðîíèçèðîâàòü èçìåðåíèÿ è óïðîñòèòü àíàëèç äàííûõ.

Ðèñ. 1.12: Ïðèìåð ñåàíñà ñ ¾1w¿ è ¾2w¿ ïåðåêëþ÷åíèÿìè

Äëÿ âîññòàíîâëåíèÿ äàííûõ â ðåæèìå ¾2w¿ íà ó÷àñòêàõ, ñîîòâåòñòâóþ-ùèõ ðàáîòå â ðåæèìå ¾1w¿, à òàêæå äëÿ çàïîëíåíèÿ ïðîïóñêîâ â äàííûõ (âèçóàëüíî ðàçëè÷èìû íà ðèñ. 1.12, îáùåå âðåìÿ ïðîïóñêà ìåæäó ñîñåä-íèìè èíòåðâàëàìè ¾2w¿ íå áîëåå 120 ñåê) èñïîëüçîâàëèñü äàííûå ñîñåä-íèõ èíòåðâàëîâ, áëèçêèõ ê èíòåðâàëó ñ ¾1w¿ äàííûìè. Äëÿ èíòåðïîëÿöèè ïðèìåíÿëñÿ ïîëèíîì âòîðîé ñòåïåíè ïî ÷àñòîòå, ÷òî ïîçâîëèëî îáåñïå÷èòü ïëàâíîå âîññòàíîâëåíèå ñèãíàëà ñ äîñòàòî÷íîé òî÷íîñòüþ. Â ðåçóëüòàòå áûëà ïîëó÷åíà ñèíõðîííàÿ çàïèñü ÷àñòîòû ñèãíàëà äëÿ îáîèõ ðåæèìîâ

ñâÿçè (¾1w¿ è ¾2w¿), ÷òî îáåñïå÷èëî âîçìîæíîñòü èõ ñîâìåñòíîãî àíàëèçà è êîìïåíñàöèè ñèñòåìàòè÷åñêèõ ïîãðåøíîñòåé.

1.10 Îøèáêà îöåíêè ÷àñòîòû íà èíòåðâàëàõ êîíå÷íîé äëèòåëüíîñòè

Èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñìåùåíèÿ ÷àñòîòû (¾RedShift¿ ýôôåêò) êîìóíèêàöèîííûõ ðàäèîñèãíàëîâ â ðàìêàõ ìèññèè RadioAstron (RA) íà óðîâíå ïðàêòè÷åñêèõ äåéñòâèé ñâîäÿòñÿ ê ìíîãîêðàòíîó ïîâòîðåíèþ èçìåðåíèé íåñóùåé ÷àñòîòû ñèãíàëà è åãî ¾øèðèíû ëèíèè¿ (êîòîðàÿ ôàêòè÷åñêè çàäàåò îøèáêó ïîðåäåëåíèÿ íåñóùåé). Î÷åâèäíî, ÷òî â ýòîì ñëó÷àå ìàêñèìàëüíàÿ òî÷íîñòü (èëè ìèíèìàëüíàÿ îòíîñèòåëüíàÿ îøèáêà) ìîæåò áûòü ðàâíà èëè áîëüøå îòíîñèòåëüíîé ñòàáèëüíîñòè îïòèíãî âîäîðîäíîãî ñòàíäàðòà (H-Maser), èñïîëüçóåìîãî â ïðîöåññå ñèíõðîíèçàöèè ðàäèîñèãíàëîâ. Ó ìèññèè RadioAstron â òåðìèíàõ äèñïåðñèè Àëëàíà ýòî áûëà âåëè÷èíà $f=f \quad 10^{14}$ ïðè âðåìåíè óñðåäíåíèÿ 10^{2} ñåê, ÷òî â 2-3 ðàçà ëó÷øå ÷åì â ýêñïåðèìåíòå ¾Gravity Probe-A¿.

Ïðîöåäóðà èçìåðåíèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà âûïîëíÿëàñü online íà ÍÑÑ. Òèïè÷íûé ýìïèðè÷åñêèé àëãîðèòì ñîäåðæèò ðÿä ïðåîáðàçîâàíèé ìåæäó ÷àñòîòíûìè è âðåìåííûìè ïðîñòðàíñòâàìè (îáëàñòÿìè). Îáû÷íî âíà÷àëå ñòðîëñÿ ñïåêòð ñèãíàëà. Çàòåì îáëàñòü ìàêñèìóìà ÷àñòîòíûõ êîìïîíåíò ôèëüòðóåòñÿ ñïåêòðàëüíûì îêíîì è ñìåùàåòñÿ â íèçêî÷àñòîòíóþ çîíó. Âîçâðàùåíèå ê âðåìåííé îáëàñòè âîñïðîèçâîäèò ìåäëåííóþ ýâîëþöèþ ôàçû íà èíòåðâàëå íàáëþäåíèÿ; ôàçîâûé äðåéô îöåíèâàåòñÿ ñ ïîìîùüþ LSM (ìåòîä íàèìåíüøèõ êâàäðàòîâ), ÷òî ïðèâîäèò ê ïîñòðîåíèþ êðèâîé ðåãðåññèè. Ïîñëå âû÷èòàíèÿ å¼ èç ïîëíîé ôàçû ïîëó÷àþñÿ ¾îñòàòêè¿, íàçûâàåìûå ¾îñòàíîâëåííé ôàçîé¿. Ïðîèçâîäíàÿ ¾îñòàíîâëåííé ôàçû¿ êàê âûõîäíé ñèãíàë àëãîðèòìà JIVE [22] äàåò îöåíêó çíà÷åíèÿ ÷àñòîòû.

Ïðîöåäóðà ¾RedShift¿ èçìåðåíèé âûïîëíÿëàñü â êîìáèíèðîâàííé ìîäå îäíî- è äâóõïóòåâîãî ðåæèìîâ ñ ñîîòâåòñòâóþùèì ïåðâêëþ÷åíèåì ìåæäó îïðíûè ñòàíäàðòàìè ÷àñòîòíé ñèíõðîíèçàöèè (áîðòîâûì è íàçåìíûì). Äëÿ ïîëó÷åíèÿ îäíîêðàòíîãî èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà òðåáîâàëîñü èñïîëüçîâàòü äâà äâóõïóòåâûõ îòðåçêà ñ èíòåðîïëÿöèîííîé îöåíêîé ÷àñòîòû êîìóíèêàöèîííîãî ñèãíàëà ìåæäó íèì, ãäå óæå èìåëîñü èçìå-

ðåííîå çíà÷åíèå îäíîïóòåâîé ÷àñòîòû. Â èòîãå íà ñïåöèàëèçèðîâàííîì ãðà-
âèòàöèîííîì ñàìñå, äëèòåëüíîñòüþ ïîðÿäêà 40 60 ìèí, ìîãëî íàáðàòüñÿ
äî 12 íåçàâèñèìûõ èçìåðåíèé ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà.

×àñòûå ïåðåêëþ÷åíèÿ ðåæèìîâ ñèíõðîíèçàöèè, îäíàêî, ïîâëåêëè çà ñî-
áîé óõóäøåíèå ðàçðåøàþùåé ñïîñîáíîñòè àëãîðèòìà JIVE ïî èçìåðåíèþ
ïàðàìåòðîâ êîìóíèêàöèîííûõ ðàäèîñèãíàëîâ. Õîòÿ ñðåäíÿÿ ÷àñòîòà íåñó-
ùåé êàê ïðåæäå äîïóñêàëà èçìåðèòåëüíóþ îöåíêó, å¼ òî÷íîñòü, ò.å. ¾øè-
ðèíà ëèíèè¿ òåïåðü íå ìîãëà áûòü èçìåðåíà äîñòîâåðíî. Àëãîðèòì JIVE
ýôôåêòèâíî ðàáîòàåò òîëüêî äëÿ äëèííûõ ñèãíàëîâ. Â ÷àñòíîñòè, â ìèññèè
ÐàäèîÀñòðîí ýòî êîìóíèêàöèîííûå ñèãíàëû ñ äëèòåëüíîñòüþ 20 ìèíóò è
áîëåå.

Â ýòèõ óñëîâèÿõ ïðàêòè÷åñêè åäèíñòâåííîé âîçìîæíîñòüþ îñòàåòñÿ îá-
ðàùåíèå ê àëãîðèòìó ìàêñèìàëüíîãî ïðàâäîïîäîáèÿ â çàäà÷å ïîèìàëüíîé
îöåíêè ïàðàìåòðîâ ïðèíèìàåìîãî ñèãíàëà (â äàííîì ñëó÷àå, åãî íåñóùåé
÷àñòîòû). Ìàòåìàòè÷åñêèé àïïàðàò ñîîòâåòñòâóþùåé òåîðèè õîðîøî ðàç-
ðàáîòàí, îñîáåííî íà ôîíå ãàóññîâûõ øóìîâ. Â ðàìêàõ äàííîãî ïîäõîäà
èìååò ìåñòî ýôôåêòèâíàÿ (íåñìåùåííàÿ) îöåíêà äèñïåðñèè íåñóùåé ÷à-
ñòîòû D_f ñèãíàëà â ôîðìå, òàê íàçûâàåìîãî ¾íåðàâåíñòâà Êðàìåðà-Ðàî¿
â âèäå:

$$D_f \quad (1=I_f); \qquad (1.13)$$

ãäå I_f èíôîðìàöèîííàÿ ìàòðèöà Ôèøåðà (â ñëó÷àå âåêòîðà ïàðàìåòðîâ è
èíôî-ìîäóëü äëÿ åäèíè÷íîãî ýëåìåíòà). Å¼ ñâÿçü ñ ëîãàðèôìîì ôóíêöèè
ïðàâäîïîäîáèÿ (f) îïðåäåëåíà ôîðìóëîé $jI_f j = \frac{@^2 \log(f)}{@f^2}$. Òàêèì îáðàçîì,
¾ãðàíèöà Êðàìåðà-Ðàî¿ îïðåäåëÿåò ìèíèìàëüíîå çíà÷åíèå äèñïåðñèè èç-
ìåðÿåìîãî ïàðàìåòðà. Êëþ÷åâûì âîïðîñîì äëÿ ïðàêòèêè ñëóæèò âîïðîñ,
ïðè êàêèõ óñëîâèÿõ â ðåàëüíîì ýêñïåðèìåíòå íåðàâåíñòâî â ôîðìóëå (1.13)
ìîæíî çàìåíèòü ðàâåíñòâîì. Ýòà ïðîáëåìà íåîäíîêðàòíî îáñóæäàëàñü êàê
ñ ÷èñòî òåîðåòèêî-ìàòåìàòè÷åñêîé òî÷êè çðåíèÿ [23, 24, 25, 26, 27], òàê
è ïðàêòè÷åñêèìè èçìåðèòåëÿìè â ñâÿçè ñ ðàçíîîáðàçíûìè çàäà÷àìè ïðå-
äåëüíûõ èçìåðåíèé, ãëàâíûì îáðàçîì â ðàäèîíàâèãàöèè è ðàäèîëîêàöèè
[29, 30, 31, 32, 33].

Òàê, â ìàòåìàòè÷åñêîé ìîíîãðàôèè [25] óêàçûâàåòñÿ, ÷òî â âûðàæåíèè
(1.13) ìîæíî èñïîëüçîâàòü çíàê ðàâåíñòâà äëÿ âûáîðîê ñ íåâûðîæäåííîé

ìàòðèöåé Ôèøåðà è íåñìåùåííûìè (ýôôåêòèâíûìè) îöåíêàìè. Â ðàáîòàõ [29, 30, 31] ðàññìàòðèâàëèñü âîïðîñû îïòèìàëüíîé îöåíêè è êîìïåíñàöèè äîïëåðîâñêîé äåôîðìàöèè (ñäâèãà), à òàêæå çàäåðæêè ñèãíàëîâ ëåòàòåëüíûõ àïïàðàòîâ ïðè èõ íàçåìíîì è êîñìè÷åñêîì ïðèåìå. Ïîêàçàíî, ÷òî ñòàíäàðòíóþ çàäà÷ó - ôîðìèðîâàíèå óðàâíåíèé äëÿ ïîëó÷åíèÿ îöåíêè èíôîðìàöèîííûõ ïàðàìåòðîâ è âû÷èñëåíèå èõ äèñïåðñèé - ïðè áîëüøîì îòíîøåíèè ñèãíàë/øóì îïòèìàëüíî ðåøàòü ïî ìåòîäó ìàêñèìàëüíîãî ïðàâäîïîäîáèÿ. Èçâåñòíî, ÷òî ìàêñèìàëüíî ïðàâäîïîäîáíûå îöåíêè (âû÷èñëåííûå ñ óñðåäíåíèåì ïî ôàçå ôóíêöèîíàëà ïðàâäîïîäîáèÿ èëè áåç) àñèìïòîòè-÷åñêè ñîñòîÿòåëüíû è ýôôåêòèâíû, ò. å. èõ äèñïåðñèÿ ñîâïàäàåò ñ íèæíåé ãðàíèöåé Êðàìåðà-Ðàî. Â ïóáëèêàöèÿõ [32, 33] àíàëîãè÷íûå âîïðîñû îá-ñóæäàþòñÿ óæå â îïòè÷åñêîì äèàïàçîíå äëèí âîëí, ïðèìåðîì ñ òåìè æå ðåêîìåíäàöèÿìè ïî óâåëè÷åíèþ îòíîøåíèÿ SNR â òðàíñëÿöèîííûõ è ëî-êàöèîííûõ ñèãíàëàõ. Âîçâðàùàÿñü ê ðåçóëüòàòàì ìèññèè ¾ÐàäèîÀñòðîí¿ óêàæåì, ÷òî îöåíêà òî÷íîñòè èçìåðåíèÿ ãðàâèòàöèîííîãî ñäâèãà áûëà âû-ïîëíåíà íà îñíîâå âû÷èñëåíèÿ ïðääåëà Êðàìåðà-Ðàî â èçìåðèòåëüíûõ ñå-àíñàõ ñ îòíîøåíèåì SNR = 10^5 10^6 [34].

1.11 Êîìïåíñàöèÿ ýôôåêòà Äîïïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ìà-ëîñòè

Äëÿ èçìåðåíèÿ ïàðàìåòðà íàðóøåíèÿ ñ òî÷íîñòüþ íå õóæå 10^{-5} íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü ýôôåêò Äîïïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà ìàëîñòè. Ýòîò ýôôåêò âîçíèêàåò èç-çà îòíîñèòåëüíîãî äâèæåíèÿ êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà (ÊÀ) è íàçåìíîé ñòàíöèè. Äëÿ ýòîé öåëè áûëè èñïîëüçîâàíû ôîðìóëû èç ðàáîòû [18]. Ðåëÿ-òèâèñòñêèé ýôôåêò Äîïïëåðà îöåíèâàåòñÿ ñ èñïîëüçîâàíèåì âåêòîðîâ îð-áèòàëüíîãî ñîñòîÿíèÿ êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà, íàðÿäó ñ âåêòîðàìè ñîñòîÿ-íèÿ íàçåìíûõ ñòàíöèé, âû÷èñëåííûìè ñ èñïîëüçîâàíèåì ìîäåëè âðàùåíèÿ Çåìëè IAU, ðåàëèçîâàííé â áèáëèîòåêå SOFA.

Äàëåå ðàññìàòðèâàåòñÿ âûâîä ôîðìóëû äëÿ êîìïåíñàöèè ðåëÿòèâèñò-ñêîãî ýôôåêòà Äîïïëåðà. Ñíà÷àëà ðàññìîòðèì êèíåìàòè÷åñêèå ýôôåêòû â ðåæèìå ¾1w¿ :

$$\frac{f_{1w}}{f_{nominal}} = \frac{D_{\cdot}}{c} + \frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{2c^2} + \frac{D \quad a_s}{c^2} \qquad (1.14)$$

Ðèñ. 1.13: Çàâèñèìîñòü âêëàäà ýôôåêòà Äîïëåðà 2-ãî ïîðÿäêà íà îäíîì îðáèòàëüíîì öèêëå

Äàëåå ðàññìîòðèì êèíåìàòè÷åñêèå ýôôåêòû â ðåæèìå ¾2w¿ :

$$\frac{f_{2w}}{f_{nominal}} = \quad 2\frac{D}{c} + 2\frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{c^2} + 2\frac{D \quad a_s}{c^2} \quad 2\frac{D \quad a_e}{c^2} \qquad (1.15)$$

Ïðèìåíÿÿ êîìïåíñàöèîííóþ ñõåìó 1.11, èìååì:

$$\frac{f_{1w}^{kin}}{f_{nominal}} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{f_{2w}^{kin}}{f_{nominal}} =$$

$$= \quad \frac{D}{c} \quad \frac{1}{2} \quad 2\frac{D}{c}\Bigg! + \frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{2c^2} \quad \frac{1}{2} \quad 2\frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{c^2} +$$

$$+ \frac{D \quad a_s}{c^2} \quad \frac{1}{2} \quad 2\frac{D \quad a_s}{c^2}\Bigg! \quad \frac{1}{2} \quad 2\frac{D \quad a_e}{c^2}\Bigg! = \frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{c^2} + \frac{D \quad a_e}{c^2} = \qquad (1.16)$$

$$= \frac{j\forall_e \quad \forall_s j^2}{c^2} + \frac{a_e \quad n_{32}}{c} \quad t$$

Äëÿ òîãî ÷òîáû íàéòè óñêîðåíèå ñòàíöèè a_e, ìû èñïîëüçóåì íàâèãàöèîííûé ïàêåò SOFA, êîòîðûé âûäàåò íàì äàííûå â ñèñòåìå GCRS (Geocentric Celestial Reference System). Äàííûå î ñêîðîñòè ÊÀ ìû áåðåì îò áàëëèñòè÷åñêîé ãðóïïû ñîïðîâîæäåíèÿ. Ðàñ÷åò îðáèòû ïðîâîäèòñÿ ñëîæíûì îáðàçîì [19], ó÷èòûâàåòñÿ âëèÿíèå ñîëíå÷íîãî âåòðà, ìàãíèòíîãî ïîëÿ, êîððåêòèðîâîê ïîëîæåíèÿ ÊÀ íà îðáèòå ñ ïîìîùüþ äâèãàòåëåé, âëèÿíèå òðîïîñôåðû, à òàêæå ïðîâîäëèàñü êîððåêòèðîâêà äàííûõ ðåêîíñòðóèðîâàííé îðáèòû

â òå÷åíèå ïåðèîäà ðàáîòû ÊÀ. Ìû ïîëüçîâàëèñü ïîñëåäíåé âåðñèåé ðåêîíñòðóêòîâàííîé îðáèòû, êîòîðàÿ áûëà äîñòóïíà â áàçå äàííûõ webinet. Îðáèòàëüíûå äàííûå ÊÀ ïðåäñòàâëÿþò ñîáîé òàáëèöó ñî çíà÷åíèÿìè âåêòîðîâ ñêîðîñòè è êîîðäèíàòû ÊÀ â ñèñòåìå êîîðäèíàò EME2000.

Òî÷íîñòü ïîðåäåëåíèÿ ñêîðîñòè 2 ìì/ñ, êîîðäèíàòû 300 ì. Ïîäñòàâëÿÿ äàííûå î ñêîðîñòè ÊÀ è ÍÑÑ â ôîðìóëó 1.16, ìû ïîëó÷àëè ðàññ÷èòàííóþ âåëè÷èíó ðåëÿòèâèñòñêîãî Äîïëåð-ýôôåêòà. Äëÿ óïðîùåíèÿ ïðîöåäóðû îáðàáîòêè ìû àâòîìàòèçèðîâàëè ïðîöåññ çàãðóçêè è ðàñ÷åòà äàííûõ.

Ðèñ. 1.14: Îòíîñèòåëüíûé âêëàä ðàçëè÷íûõ ýôôåêòîâ

1.12 Íàçåìíûå ýêñïåðèìåíòû è îöåíêè èõ òî÷íîñòè

Îäíèì èç ïîñëåäíèõ óñïåøíûõ ýêñïåðèìåíòîâ ïî èçìåðåíèþ ¾RedShift¿ ýôôåêòà ñòàë ëàáîðàòîðíûé òåñò ãðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ ñ ïîìîùüþ ìèíèàòþðíîé ñåòè ÷àñîâ, ïðîâåäåííûé ãðóïïîé ó÷åíûõ â 2023 ãîäó [20].

Îïòè÷åñêèå ÷àñû â íàñòîÿùåå âðåìÿ äîñòèãëè óðîâíÿ íåñòàáèëüíîñòè è íåòî÷íîñòè íà óðîâíå 10^{18} è íèæå. Ýòî äåëàåò èõ ÷óâñòâèòåëüíûì èíñòðóìåíòîì äëÿ èññëåäîâàíèÿ ãåîìîòåíöèàëà íà ñóáñàíòèìåòðîâîé øêàëå. Ýêñïåðèìåíò ïðîâîäèëñÿ ñ èñïîëüçîâàíèåì êàìåðû, â êîòîðîé ðàçìåùàëñÿ ìàññèâ èç 5 àíñàìáëåé àòîìîâ ^{87}Sr (ïðîíóìåðîâàííûõ îò 1 äî 5 ñâåðõó âíèç). Àòîìû áûëè çàõâà÷åíû â âåðòèêàëüíóþ îäíîìåðíóþ ïîòè÷åñêóþ ðåø¼òêó äëÿ äèôôåðåíöèàëüíûõ ñðàâíåíèé ÷àñîâ. Ðàññòîÿíèå ìåæäó ñîñåäíèìè àíñàìáëÿìè ñîñòàâëÿëî 0:25 ñì, îõâàòûâàÿ îáùóþ ðàçíèöó âûñîò â 1 ñì.

Èç-çà ðàâèòàöèîííîãî êðàñíîãî ñìåùåíèÿ ÷àñû â àíñàìáëÿõ, íàõîäÿùèõñÿ â áîëåå âûñîêîì ãðàâèòàöèîííîì ïîòåíöèàëå, øëè áûñòðåå, ÷åì ÷àñû â áîëåå íèçêîì ïîòåíöèàëå. Ýòî ðàçëè÷èå ïîçâîëèëî òî÷íî èçìåðÿòü ãðàâèòàöèîííûå ïîòåíöèàëû, èñïîëüçóÿ ýôôåêò, ïðåäñêàçàííûé ÎÒÎ. Ïîñðåäñòâîì ôèíàëüíîé ëèíåéíîé àïïðîêñèìàöèè áûë íàéäåí ÷àñòîòíûé ãðàäèåíò, ðàâíûé (11.9 2.5) 10^{19}/ñì, ÷òî ñîãëàñîâûâàëîñü ñ îæèäàåìûì çíà÷åíèåì ¾RedShift¿. Äîìèíèðóþùèì ôàêòîðîì ÿâëÿëàñü ñèñòåìàòè÷åñêàÿ ïîãðåøíîñòü, îáóñëîâëåííàÿ äèôôåðåíöèàëüíûì ñäâèãîì ïëîòíîñòè. Àâòîðû îòìå÷àþò, ÷òî â áóäóùèõ ýêñïåðèìåíòàõ âîçìîæíî óìåíüøåíèå ñèñòåìàòè÷åñêîé ïîãðåøíîñòè çà ñ÷åò âíåäðåíèÿ íîâîé òåõíèêè êîìïåíñàöèè ñäâèãà ïëîòíîñòè.

1.13 Ïîñëåäóþùèå ýêñïåðèìåíòû

The Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) ðåàëèçóåòñÿ Åâðîïåéñêèì êîñìè÷åñêèì àãåíòñòâîì, ïëàíèðóåòñÿ óñòàíîâêà íà Ìåæäóíàðîäíóþ êîñìè÷åñêóþ ñòàíöèþ (ÌÊÑ) ïàðû àòîìíûõ ñòàíäàðòîâ ÷àñòîòû è âðåìåíè âîäîðîäíîãî H-ìàçåðà è öåçèâîãî ôîíòàíà PHARAO. Ýêñïåðèìåíò ïðåäïîëàãàåò íàêîïëåíèå äàííûõ â òå÷åíèå 30 ìåñÿöåâ, ïðè÷åì êàæäûé ñåàíñ

äàííûõ áóäåò äëèòüñÿ 25 äíåé. Ïîëåçíûé ñèãíàë ACES áóäåò ïåðåäàâàòüñÿ íà ñåòü íàçåìíûõ ÷àñîâ ïîñðåäñòâîì äâóõ âðåìåííûõ è ÷àñòîòíûõ çâåíüåâ: ìèêðîâîëíîâîé ñâÿçüþ (MWL), ðàáîòàþùåé íà ìèêðîâîëíîâûõ ÷àñòîòàõ, è ïîòè÷åñêîé ñâÿçüþ European Laser Timing (ELT).

Íàçåìíûå òåðìèíàëû MWL â Åâðîïå, Âåëèêîáðèòàíèè, ÑØÀ è ßïîíèè áóäóò âçàèìîäåéñòâîâàòü ñ ACES äëÿ îáìåíà èíôîðìàöèåé î âðåìåíè, êîìïåíñèðóÿ âîçäåéñòâèå àòìîñôåðû.

Òî÷íîñòü ýêñïåðèìåíòà îöåíèâàåòñÿ â (2 3) 10^{6}.

Ãëàâà 2

Ôèëüòðàöèÿ àòìîñôåðíûõ ïîìåõ è ó÷åò ôëèêêåð-øóìîâ â ýêñïåðèìåíòàëüíûõ äàííûõ

2.1 Êîìïåíñàöèÿ òðîïîñôåðíîãî è èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ðàäèî÷àñòîòû

Àòìîñôåðà ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ãàçîâóþ îáîëî÷êó, îêðóæàþùóþ ïëàíåòó Çåìëÿ è ó÷àñòâóþùóþ â å¼ ñóòî÷íîì âðàùåíèè êàê åäèíîå öåëîå, ñîñòîÿùóþ èç ñìåñè ãàçîâ è âîäÿíûõ ïàðîâ [48]. Îñíîâíûå êîìïîíåíòû àòìîñôåðû ïðèâåäåíû â òàáëèöå 2.1.

Òàáëèöà 2.1: Ñîñòàâ àòìîñôåðû è êîíöåíòðàöèÿ îñíîâíûõ êîìïîíåíòîâ

Àçîò	N_2	78.11%
Êèñëîðîä	O_2	20.95%
Àðãîí	Ar	0.93%
Íåîí	Ne	$18.18 10^{4}$ %
Ãåëèé	He	$5.24 10^{4}$%
Âîäà	H_2O	îò 0 äî 7%
Óãëåêèñëûé ãàç	CO_2	îò 0.01 äî 0.1%
Îçîí	O_3	îò 0 äî 0.00001%

Çà èñêëþ÷åíèåì ìîëåêóëÿðíîãî êèñëîðîäà, äóãèå êîìïîíåíòû õèì÷åñêè íåàêòèâíû è ïîýòîìó ñîõðàíÿþò îäíàêîâóþ îáúåìíóþ êîíöåíòðàöèþ

Äàííàÿ ãëàâà îñíîâàíà íà ðàáîòå 2 èç ñïèñêà ïóáëèêàöèé ïî òåìå äèññåðòàöèè

äî âûñîòû 100 110 êì [49]. Íåàêòèâíûå êîìïîíåíòû, òàêèå êàê äèîêñèä óãëåðîäà, èãðàþò âàæíóþ ðîëü â ýíåðãåòè÷åñêîì áàëàíñå, â òî âðåìÿ êàê àêòèâíûå êîìïîíåíòû, òàêèå êàê îçîí, íåñìîòðÿ íà åãî î÷åíü íèçêóþ êîí-öåíòðàöèþ, èãðàþò âàæíóþ ðîëü â ïîãëîùåíèè ÓÔ-èçëó÷åíèÿ è ðåíòãåíîâ-ñêèõ ëó÷åé. Âàæíûì ïàðàìåòðîì àòìîñôåðû ÿâëÿåòñÿ äàâëåíèå p, ðàâíîå 101.3 êÏà íà óðîâíå ìîðÿ è óìåíüøàþùåéñÿ âìåñòå ñ ïëîòíîñòüþ ïðè óâåëè÷åíèè âûñîòû. Äàâëåíèåp íà âûñîòå h îïðåäåëÿåòñÿ íà åäèíèöó ïëî-ùàäè ïîâåðõíîñòè êàê âåñ âñåãî âîçäóõà âûøåh:

$$p = p_0 \int_0^h g(h^0)\ (h^0)dh^0; \qquad (2.1)$$

ãäåp$_0$ - äàâëåíèå íà óðîâíå ìîðÿ, g - óñêîðåíèå ñâîáîäíîãî ïàäåíèÿ íà âûñî-òåh^0 Äóóãèì ñóùåñòâåííûì ïàðàìåòðîì, õàðàêòåðèçóþùèì íåéòðàëüíóþ àòìîñôåðó, ÿâëÿåòñÿ âûñîòà îäíîðîäíîé àòìîñôåðû:

$$H = \frac{kT}{gm}; \qquad (2.2)$$

ãäåm - ñðåäíÿÿ ìàññà ìîëåêóëû ñìåñè ãàçîâ â âîçäóõå,T - òåìïåðàòóðà â Êåëüâèíàõ,k - ïîñòîÿííàÿ Áîëüöìàíà.

Ðèñ. 2.1: Ãðàôèê äàâëåíèÿ â çåìíîé àòìîñôåðå îò âûñîòû

Ïðè óñëîâèè ïîñòîÿíñòâà òåìïåðàòóðû è ñîñòàâà àòìîñôåðû íà âñåõ âû-ñîòàõ, çàâèñèìîñòü äàâëåíèÿ è êîíöåíòðàöèè îò âûñîòû ïîñûâàåòñÿ ñëå-

äóþùèìè áàðîìåòðè÷åñêèìè ôîðìóëàìè:

$$p = p_0 \exp \int_0^h \frac{gM}{T} dh = p_0 \exp \int_0^h \frac{dh}{H} ; \qquad (2.3)$$

ãäåM - ìîëåêóëÿðíàÿ ìàññà.

Êëþ÷åâûì ïàðàìåòðîì, èñïîëüçóåìûì äëÿ ïîèñàíèÿ âåðòèêàëüíîé ñòðóêòóðû è îáëàñòåé àòìîñôåðû, ÿâëÿåòñÿ ïîâåäåíèå òåìïåðàòóðû ñ âûñîòîé, ïîñêîëüêó ýòà çàâèñèìîñòü îòðàæàåò ìíîãî÷èñëåííûå ôèçè÷åñêèå è õèìè÷åñêèå ïðîöåññû â àòìîñôåðå. Äàëåå áóäåò ïîêàçàíî, ÷òî ýëåêòðîííàÿ ïëîòíîñòü ìîæåò áûòü èñïîëüçîâàíà äëÿ îïèñàíèÿ âåðòèêàëüíîé ñòðóêòóðû èîíîñôåðû. Îò ïîâåðõíîñòè Çåìëè äî 10 êì íàä ïîëþñàìè è äî 15 êì íàä ýêâàòîðèàëüíûì ðàéîíàìè ñðåäíåå ñíèæåíèå òåìïåðàòóðû ñîñòàâëÿåò îêîëî 6.5 ãðàäóñîâ íà êì äî óðîâíÿ, íàçûâàåìîãî òðîïîïàóçîé [50]. Äî ýòîãî óðîâíÿ íàõîäèòñÿ ÷àñòü àòìîñôåðû, ãäå ïðåîáëàäàþò òåðìîäèíàìè÷åñêèå ïðîöåññû. Ïðè÷èíé òàêîãî ñíèæåíèÿ òåìïåðàòóðû ÿâëÿåòñÿ âåðòèêàëüíîå êîíâåêòèâíîå äâèæåíèå âîçäóõà: ãàç, êîíòàêòèðóþùèé ñ òåïëîé ïîâåðõíîñòüþ Çåìëè, ðàñøèðÿåòñÿ è îõëàæäàåòñÿ ïðè äâèæåíèè ââåðõ. Íàä òðîïîñôåðîé è òðîïîïàóçîé òåìïåðàòóðà ñíîâà íà÷èíàåò ïîâûøàòüñÿ ñ -70 äî 0 ^{o}C, äî âûñîòû 50 êì, îãðàíè÷åííé ñòðàòîïàóçîé. Âûøå ìàêñèìàëüíîé âûñîòû, îêîëî 50 êì, òåìïåðàòóðà íà÷èíàåò ñíîâà ñíèæàòüñÿ â ïåðåõîäíîé îáëàñòè, íàçûâàåìîé ìåçîñôåðîé, ïðîäîëæàÿñü ïðèìåðíî äî 90 êì, ãäå òåìïåðàòóðà äîñòèãàåò ïðèìåðíî îò -70 äî -90°C. Âåðõíèé ïðåäåë ìåçîñôåðû - ýòî ìåçîïàóçà, íàä êîòîðîé íàõîäèòñÿ òåðìîñôåðà, â íåé òåìïåðàòóðà ñíîâà âîçðàñòàåò èç-çà ïîãëîùåíèÿ óëüòðàôèîëåòîâûõ ëó÷åé êèñëîðîäîì è àçîòîì, äîñòèãàÿ òåìïåðàòóðû 1500°C íà âûñîòå 200 300 êì. Âåùåñòâî íà ýòîé âûñîòå èìååò ÷ðåçâû÷àéíî íèçêóþ ïëîòíîñòü è, ñëåäîâàòåëüíî, òåìïåðàòóðíûé ïàðàìåòð íå èìååò ñìûñëà, è ëó÷øå ó÷èòûâàòü ñðåäíþþ êâàäðàòè÷íóþ ñêîðîñòü ÷àñòèö. Â òåðìîñôåðå è âåðõíåé îáëàñòè ýêçîñôåðû ñèëüíîå ÓÔ-èçëó÷åíèå è ðåíòãåíîâñêîå èçëó÷åíèå âûçûâàþò èíòåíñèâíóþ èîíèçàöèþ, ïîýòîìó ýòè äâå îáëàñòè ïåðåêðûâàþòñÿ ñ èîíîñôåðîé. Ãðàôèê ðàñïðåäåëåíèÿ ñëîâ â àòìîñôåðå Çåìëè è çàâèñèìîñòü òåìïåðàòóðû ïðåäñòàâëåíà íà ðèñ. 2.2

Ðèñ. 2.2: Ãðàôèê çàâèñèìîñòè òåìïåðàòóðû â çåìíîé àòìîñôåðå îò âûñîòû

Âëèÿíèå àòìîñôåðû ïðèâîäèò ê ñèñòåìàòè÷åñêèì ñäâèãàì ñèãíàëà ÊÀ ¾ÐàäèîÀñòðîí¿, êîòîðûé ïðîÿâëÿåòñÿ ÷åðåç íåñêîëüêî ôèçè÷åñêèõ ìåõà-íèçìîâ:

1. Ñèñòåìàòè÷åñêèå ñäâèãè ñèãíàëà âîçíèêàþò èç-çà ðåôðàêöèè ðàäèî-âîëí â àòìîñôåðå, âðåìåííûõ âàðèàöèé ïîêàçàòåëÿ ïðåëîìëåíèÿ, íåñòà-öèîíàðíîñòè àòìîñôåðíûõ ïàðàìåòðîâ.
2. Â íåñòàöèîíàðíîé ñðåäå ïîêàçàòåëü ïðåëîìëåíèÿ n(t) ìåíÿåòñÿ ñî âðå-

ìåíåì, ÷òî ïðèâîäèò ê ÷àñòîòíûì ñäâèãàì ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí, èñêàæåíèþ ôàçîâîé ñòðóêòóðû ñèãíàëà, âðåìåííûì çàäåðæêàì ðàñïðîñòðàíåíèÿ.

3. Îñíîâíûå ôàêòîðû âëèÿíèÿ àòìîñôåðû: âåðòèêàëüíàÿ íåîäíîðîäíîñòü àòìîñôåðû, òóðáóëåíòíûå ôëóêòóàöèè, ñåçîííûå è ñóòî÷íûå âàðèàöèè.

4. Èçìåíåíèå n(t), âûçâàííîå äâèæåíèåì ÊÀ ïî îðáèòå.

Ãëàâíûì îáðàçîì, âàðèàöèÿ ÷àñòîòû ñèãíàëà ñâÿçàíà ñ:

1. Íåñòàöèîíàðíîñòüþ ñàìèõ ñðåä èîíîñôåðû è òðîïîñôåðû.

2. Èçìåíåíèåì ðàññòîÿíèÿ ¾ïðÿìîé âèäèìîñòè¿ (ïóòè ðàäèîëó÷à â àòìîñôåðå) çà ñ÷åò îðáèòàëüíîãî äâèæåíèÿ ñïóòíèêà - äàëåå áóäåò ïîêàçàíî, ÷òî ýòîò ýôôåêò äîìèíèðóþùèé.

Íà îòíñèòåëüíî êîðîòêèõ ñåàíñàõ ñâÿçè ñïóòíèêà ñ ÍÑÑ (ìåíåå ÷àñà) âòîðàÿ ïðè÷èíà ÿâëÿåòñÿ äîìèíèðóþùåé (äàåò ñäâèã áîëåå ÷åì íà ïîðÿäîê ïðåâûøàþùèé ñäâèã ¾íåñòàöèîíàðíîñòè¿ ñðåäû èîíîñôåðû è òðîïîñôåðû).

Ðàñ÷åò êèíåìàòè÷åñêîãî ñäâèãà ìåòîäè÷åñêè îäèíàêîâ äëÿ èîíîñôåðû è òðîïîñôåðû. Ñóùåñòâåííîå îòëè÷èå ñâÿçàíî ñ äèñïåðñèîííûìè ñâîéñòâàìè ýòèõ ñðåä:

1. Òðîïîñôåðíûé ñäâèã íå çàâèñèò îò ÷àñòîòû ýëåêòðîìàãíèòíîãî ñèãíàëà, åñëè îíà ìåíüøå 15ÃÃö [51].

2. Îòíîñèòåëüíûé èîíîñôåðíûé ñäâèã îáðàòíî ïðîïîðöèîíàëåí êâàäðàòó ÷àñòîòû ($\frac{1}{f^2}$) íåñóùåãî ñèãíàëà [54].

Â ¾îäíîïóòåâîì¿ òèïå ñâÿçè (ñïóòíèê ! ÍÑÑ) ñèãíàë ñ îïðîé íà áîðòîâîé Í-ñòàíäàðò ñîäåðæèò êàê ãðàâèòàöèîííûé ñäâèã ÷àñòîòû, òàê è äóãèå ñäâèãè:

1. Äîïëåðîâñêèé ñäâèã -$\frac{v}{c}$,

2. Èîíîñôåðíûé ñäâèã 1=f ^{2},

3. Òðîïîñôåðíûé ñäâèã,

Ðèñ. 2.3: Àòîìñôåðà

4. Äîïëåðîâñêèé ñäâèã âòîðîãî ïîðÿäêà - $(\frac{v}{c})^2$.

Â ¾äâóõïóòåâîì¿ (ñïóòíèê$ ÍÑÑ) òèïå ñâÿçè, ñèãíàë ñîäåðæèò òîëüêî íåãðàâèòàöèîííûå ïîìåõè, êîòîðûå óäâîåíû èç-çà óâåëè÷åíèÿ ïóòè ñèãíàëà â 2 ðàçà. Áëàãîäàðÿ óäâîåíèþ ýôôåêòîâ ìû ìîæåì ïðèìåíÿòü êîìïåíñàöèîííóþ ñõåìó äëÿ ñäâèãîâ, êîòîðûå íå èìåþò ÷àñòîòíîé çàâèñèìîñòè.

Â àòìîñôåðå, êàê ïðàâèëî, âîçäóøíûå ìàññû ó÷àñòâóþò â íåïðåðûâíîì äâèæåíèè (ãîðèçîíòàëüíàÿ è âåðòèêàëüíàÿ öèðêóëÿöèÿ, âåòðû, ñòðóéíûå òå÷åíèÿ è ò.ä.) è â ñëó÷àéíì òóðáóëåíòíì äâèæåíèè [55]. Âñå ýòî ïðèâîäèò ê áûñòðûì ïðîñòðàíñòâåííûì èçìåíåíèÿì ôèçè÷åñêèõ ñâîéñòâ àòìîñôåðû (äàâëåíèå, òåìïåðàòóðà, âëàæíîñòü, çàïûë¼íîñòü, êîíöåíòðàöèÿ çàðÿæåííûõ ÷àñòèö è ò.ä.) è, ñîîòâåòñòâåííî, åå ýëåêòðîìàãíèòíûõ ñâîéñòâ. Ýëåêòðîìàãíèòíûå õàðàêòåðèñòèêè çåìíîé àòìîñôåðû ïðåìóùåñòâåííî îáóñëîâëåíû ãàçîâîé ñîñòàâëÿþùåé âîçäóøíîé ñðåäû (êàê íåéòðàëüíîé, òàê è èîíèçèðîâàííîé ôðàêöèåé), à òàêæå ïàðöèàëüíûì äàâëåíèåì âîäÿíîãî ïàðà. Âñëåäñòâèå íåîäíîðîäíîñòè ïëîòíîñòè ïëàçìåííîãî è ãàçîâîãî êîìïîíåíòîâ àòìîñôåðû íàáëþäàåòñÿ ïðîñòðàíñòâåííî-âðåìåííàÿ èçìåí-

÷èâîñòü ïîêàçàòåëÿ ïðåëîìëåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí. Ñóùåñòâîâàíèå ãðàäèåíòà ïîêàçàòåëÿ ïðåëîìëåíèÿ ïðèâîäèò ê òîìó, ÷òî òðàåêòîðèÿ ðàñïðîñòðàíåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíîãî ñèãíàëà ïðèîáðåòàåò óâåëè÷åííûé ãåîìåòðè÷åñêèé ïóòü ïî ñðàâíåíèþ ñ òðàåêòîðèåé â îòñóòñòâèå àòìîñôåðíîé ñðåäû.

Ýëåêòðîìàãíèòíàÿ âîëíà, ðàñïðîñòðàíÿþùàÿñÿ â íàïðàâëåíèè x, çàïèñûâàåòñÿ òàê:

$$s(x;t) = s_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0); \qquad (2.4)$$

ãäå $\omega = 2\pi/T$; $k = 2\pi/\lambda$; T - ïåðèîä, k - âîëíîâîå ÷èñëî.

Ñêîðîñòü, ñ êîòîðîé ïåðåìåùàþòñÿ ïëîñêîñòè ðàâíîé ôàçû, íàçûâàåòñÿ ôàçîâîé ñêîðîñòüþ:

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \qquad (2.5)$$

Âåëè÷èíà, õàðàêòåðèçóþùàÿ ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ïàêåòà âîëí, èëè ãðóïïîâàÿ ñêîðîñòü åñòü:

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} \qquad (2.6)$$

Êîãäà $\omega(k)$, òî $v_{gr} = v_{ph}$ ñðåäà íå îáëàäàåò äèñïåðñèåé. Â óñëîâèÿõ îòñóòñòâèÿ äèñïåðñèè ôàçîâàÿ ñêîðîñòü âîëí äåìîíñòðèðóåò íåçàâèñèìîñòü îò èõ ÷àñòîòû. Ïîêàçàòåëü ïðåëîìëåíèÿ n, ÿâëÿþùèéñÿ êëþ÷åâûì ïîèè÷åñêèì ïàðàìåòðîì ñðåäû, ïîðåäåëÿåòñÿ êàê îòíîøåíèå ñêîðîñòè ðàñïðîñòðàíåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíîãî ñèãíàëà â âàêóóìå c ê ñêîðîñòè åãî ðàñïðîñòðàíåíèÿ â äàííîé ñðåäå. Ïîýòîìó äëÿ ãðóïïîâîé è ôàçîâîé ñêîðîñòè ìîæíî ïîðåäåëèòü äâà ðàçíûõ ïîêàçàòåëÿ ïðåëîìëåíèÿ [56]:

$$n_{ph} = \frac{c}{v_{ph}} \quad è \quad n_{gr} = \frac{c}{v_{gr}} \qquad (2.7)$$

Òàêèì îáðàçîì, ïîêàçàòåëü ïðåëîìëåíèÿ âûñòóïàåò â êà÷åñòâå èíòåãðàëüíîé õàðàêòåðèñòèêè ñðåäû, ïîðåäåëÿþùåé å¼ ïîòè÷åñêèå ñâîéñòâà è ïîçâîëÿþùåé êîëè÷åñòâåííî îöåíèòü âëèÿíèå ñðåäû íà ðàñïðîñòðàíåíèå ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí.

Èíîíñôåðà ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ïðèðîäíóþ ïëàçìåííóþ ñðåäó ñ ÷àñòè÷íî ñòåïåíüþ èîíèçàöèè, õàðàêòåðèçóþùóþñÿ çíà÷èòåëüíîé ïðîñòðàíñòâåííîé èçìåí÷èâîñòüþ ïàðàìåòðîâ çàðÿæåííûõ êîìïîíåíòîâ. Âåðòèêàëüíîå è

ãîðèçîíòàëüíîå ðàñïðåäåëåíèå êîíöåíòðàöèé èîíèçèðîâàííûõ ÷àñòèö äåìîíñòðèðóåò âûðàæåííóþ íåîäíîðîäíîñòü, îáóñëîâëåííóþ êîìïëåêñíûìè ôèçèêî-õèìè÷åñêèìè ïðîöåññàìè â äàííîé îáëàñòè àòìîñôåðû.

Ýòà ÷àñòü àòìîñôåðû, âêëþ÷àÿ ñëîè, íàçûâàåìûå ìåçîñôåðîé, òåðìîñôåðîé è ýêçîñôåðîé, îïðåäåëÿåòñÿ êàê èîíîñôåðà. Íèæíåå 100 êì èîíîñôåðû îêàçûâàþò íåñóùåñòâåííîå âëèÿíèå íà ñèãíàë ¾ÐàäèîÀñòðîíà¿. Ïðîöåññû èîíèçàöèè ìîëåêóë è àòîìîâ ãàçîâûõ êîìïîíåíòîâ àòìîñôåðû ïðåèóùåñòâåííî èíèöèèðóþòñÿ èíòåíñèâíûì âîçäåéñòâèåì ñîëíå÷íîé ðàäèàöèè, â ÷àñòíîñòè, å¼ ðåíòãåíîâñêîãî è óëüòðàôèîëåòîâîãî ñïåêòðàëüíûõ äèàïàçîíîâ.

Ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíûõ ñèãíàëîâ äåìîíñòðèðóåò ïðÿìóþ çàâèñèìîñòü îò ýëåêòðîííîé êîíöåíòðàöèè, êîòîðàÿ ðåãóëèðóåòñÿ äâóìÿ ïðîöåññàìè.

Â òå÷åíèå ñóòîê íàáëþäàþòñÿ ñëåäóþùèå öèêëè÷åñêèå èçìåíåíèÿ:

1. Äíåâíîé ðåæèì:
   (a) Ïðåâàëèðîâàíèå ïðîöåññîâ ôîòîèîíèçàöèè
   (b) Âîçäåéñòâèå ñîëíå÷íîãî èçëó÷åíèÿ
   (c) Èîíèçàöèÿ íåéòðàëüíûõ àòîìîâ è ìîëåêóë
2. Íî÷íîé ðåæèì:
   (a) Äîìèíèðîâàíèå ïðîöåññîâ ðåêîìáèíàöèè
   (b) Ðåêîìáèíàöèÿ ñâîáîäíûõ ýëåêòðîíîâ ñ èîíàìè
   (c) Ôîðìèðîâàíèå íåéòðàëüíûõ ÷àñòèö
   (d) Ñíèæåíèå ýëåêòðîííîé êîíöåíòðàöèè

Ïðîöåññ ðåêîìáèíàöèè ïðè íèçêèõ ïëîòíîñòÿõ âîçäóõà ïðîòåêàåò ãîðàçäî ìåäëåííåå èîíèçàöèè - òàêèì îáðàçîì, â èîíîñôåðå âñåãäà ñîõðàíÿåòñÿ äîâîëüíî âûñîêàÿ êîíöåíòðàöèÿ ýëåêòðîííîâ. Ïðîñòðàíñòâåííîå ðàñïðåäåëåíèå ýëåêòðîííîé êîíöåíòðàöèè â èîíîñôåðå õàðàêòåðèçóåòñÿ âûðàæåííîé âûñîòíîé çàâèñèìîñòüþ ñ ìàêñèìóìîì â äèàïàçîíå 300-500 êèëîìåòðîâ. Âåðòèêàëüíàÿ ñòðóêòóðà èîíîñôåðû ïðåäåëÿåòñÿ ñëåäóþùèì îñîáåííî-

ñòÿìè:

1. Âûñîòíîå ðàñïðåäåëåíèå:
   (a) Ïîñòåïåííîå óâåëè÷åíèå ýëåêòðîííé ïëîòíîñòè ñ âûñîòé
   (b) Ôîðìèðîâàíèå ïèêà êîíöåíòðàöèè íà âûñîòå 300-500 êì
   (c) Ñíèæåíèå êîíöåíòðàöèè â íèæíèõ ñëîÿõ
2. Ãîðèçîíòàëüíàÿ íåîäíîðîäíîñòü:
   (a) Èçìåíåíèÿ ïàðàìåòðîâ ïî ãåîãðàôè÷åñêèì êîîðäèíàòàì
   (b) Çàâèñèìîñòü îò øèðîòíãî ðàñïîëîæåíèÿ
   (c) Âëèÿíèå ëîêàëüíûõ àòìîñôåðíûõ ïðîöåññîâ
3. Ñòðóêòóðíûå õàðàêòåðèñòèêè:
   (a) Íàëè÷èå äèñêðåòíûõ ñëîåâ èîíèçàöèè (D, E, F)
   (b) Ïåðåìåííîñòü ãðàíèö ñëîåâ
   (c) Äèíàìè÷åñêàÿ èçìåí÷èâîñòü ïàðàìåòðîâ
4. Ôàêòîðû íåîäíîðîäíîñòè:
   (a) Ñîëíå÷íàÿ àêòèâíîñòü
   (b) Ñåçîííûå êîëåáàíèÿ
   (c) Ãåîìàãíèòíûå óñëîâèÿ
   (d) Ñóòî÷íûå âàðèàöèè

Òàêèì îáðàçîì, ýëåêòðîííàÿ ñòðóêòóðà èîíîñôåðû ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ñëîæíóþ ïðîñòðàíñòâåííóþ ñèñòåìó ñ âûðàæåííûìè âûñîòíûìè ìàêñèìóìàìè è çíà÷èòåëüíîé ãåîãðàôè÷åñêîé èçìåí÷èâîñòüþ ïàðàìåòðîâ, ÷òî ïîðåäåëÿåò å¼ íåîäíîðîäíîå âëèÿíèå íà ðàñïðîñòðàíåíèå ðàäèîâîëí íàä ïîâåðõíîñòüþ Çåìëè.

Ñðåäà, â êîòîðîé óãëîâàÿ ÷àñòîòà è âîëíîâîå ÷èñëî íå ïðîïîðöèîíàëüíû, ÿâëÿåòñÿ äèñïåðñèîííîé ñðåäîé, òî åñòü ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ýëåêòðîìàãíèòíûõ âîëí, è, ñëåäîâàòåëüíî, ïîêàçàòåëü ïðåëîìëåíèÿ çàâèñÿò îò ÷àñòîòû. Ýòî îòíîñèòñÿ ê èîíîñôåðå, ãäå ! è k â ïåðâîì ïðèáëèæåíèè ñâÿçàíû:

$$! \ ^2 = c^2k^2 + ! \ ^2_p; \qquad (2.8)$$

ãäå $! \ _p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{"_0 m}}$, e çàðÿä ýëåêòðîíà, $"_0$ ýëåêòðè÷åñêàÿ ïîñòîÿííàÿ, k âîëíîâîå ÷èñëî, N_e ýëåêòðîííàÿ ïëîòíîñòü. Ýòî óðàâíåíèå íàçûâàåòñÿ äèñïåðñèîííûì óðàâíåíèåì èîíîñôåðû, à $! \ _p$ êðèòè÷åñêîé ÷àñòîòîé, â òîì ñìûñëå, ÷òî ñèãíàëû ñ $! < ! \ _p$ áóäóò îòðàæàòüñÿ, à ñèãíàëû ñ $> ! \ _p$ áóäóò ïðîõîäèòü ÷åðåç èîíîñôåðó.

Êàê áûëî óïîìÿíóòî âûøå, ìàêñèìóì ýëåêòðîííîé ïëîòíîñòè äîñòèãàåòñÿ íà âûñîòå 300-500 êì. Ýëåêòðîìàãíèòíûå ñèãíàëû ñ $f > f_p$ 10^6 Ãö áóäóò ïðîõîäèòü ÷åðåç èîíîñôåðó. Íåñóùàÿ ÷àñòîòà ñèãíàëà ¾ÐàäèîÀñòðîíà¿ 8.4 ÃÃö è 15 ÃÃö.

Ñ ó÷åòîì $! = 2 \ f$ ñëåäóåò:

$$v_{ph} = p\frac{c}{1 \quad (f_p=f)^2} \qquad (2.9)$$

Òàêèì îáðàçîì, ïîêàçàòåëü ïðåëîìëåíèÿ ôàçû äëÿ èîíîñôåðû ìîæåò áûòü àïïðîêñèìèðîâàí êàê:

$$n_{ph} = s\frac{}{1 \quad \frac{f_p}{f}^{2}} \quad 1 \quad \frac{1}{2}\frac{f_p}{f}^{2} = 1 \quad \frac{40:3}{f^2}N_e \qquad (2.10)$$

$$n_{gr} = 1 + \frac{}{f^2}N_e; \qquad (2.11)$$

ãäå $= \frac{e^2}{8 \ ^2 \ _0 m_e}$ 40:3

Ðàçíèöà ìåæäó èçìåðåííûì äèàïàçîíîì ðàññòîÿíèÿ (ïîò÷åñêèì ïóòåì) è åâêëèäîâûì ðàññòîÿíèåì ìåæäó ñïóòíèêîì è ïðèåìíèêîì îïðåäåëåíà ôîðìóëàìè:

$$\frac{iono}{ph;f} = \frac{40:3}{f^2}\int^{Z} N_e dl; \qquad \frac{iono}{gr;f} = + \frac{40:3}{f^2}\int^{Z} N_e dl; \qquad (2.12)$$

$\frac{iono}{ph;f}$ - ôàçîâîå è $\frac{iono}{gr;f}$ - ãðóïïîâîå ïðåëîìëåíèå, à èíòåãðàë îïðåäåëÿåòñÿ êàê íàêëîííûé STEC (Slant Total Electron Content):

$$TEC = \int^{Z} N_e dl \qquad (2.13)$$

Îáû÷íî TEC çàäàåòñÿ â åäèíèöàõ TEC (TECUs), 1 TECU = 10^{16}e =m^2, è èîíîñôåðíàÿ çàäåðæêà âûãëÿäèò òàê:

$$I_f \quad {}^{iono}_{gr;f} = \quad {}_f STEC \quad \text{â ìåòðàõ çàäåðæêè} \qquad (2.14)$$

$$_f = \frac{40:3 \quad 10^{16}}{f^2} m=TECU \qquad (2.15)$$

ÒÅÑ è, ñëåäîâàòåëüíî, èîíîñôåðíàÿ ðåôðàêöèÿ çàâèñÿò îò ãåîãðàôè÷åñêîãî ìåñòîïîëîæåíèÿ ïðèåìíèêà, âðåìåíè ñóòîê è èíòåíñèâíîñòè ñîëíå÷íé àêòèâíîñòè.

Íà ýòàïå ïëàíèðîâàíèÿ ýêñïåðèìåíòà ïðåäïîëàãàëîñü êîìïåíñèðîâàòü èîíîñôåðíûé ñäâèã ïóòåì êîìáèíàöèè äâóõ ÷àñòîò 8.4 ÃÃö è 15 ÃÃö, îäíàêî ïðè ïðîâåäåíèè ýêñïåðèìåíòà êîìáèíàöèÿ äâóõ ÷àñòîò äàâàëà ÷àñòîòíûé ñäâèã ñ îøèáêîé áîëåå ÷åì íà 2 ïîðÿäêà áîëüøå òåîðåòè÷åñêèõ îöåíîê. Ýòî ïîòðåáîâàëî ïðîâåðêè íà ìîäåëÿõ îäíî÷àñòîòíé êîìïåíñàöèè èîíîñôåðû ñ èñïîëüçîâàíèåì èîíîñôåðíûõ êàðò (äåòàëè ñì. íèæå). Â ðåçóëüòàòå áûëà îáíàðóæåíà òåõíè÷åñêàÿ ïðîáëåìà ñ äàííûìè 15 ÃÃö, êîòîðûå áûëè íå äîñòàòî÷íî êà÷åñòâåííûìè, ïî ïðè÷èíå áîëüøèõ øóìîâ ïðèåìíèêà äàííûõ íà 15 ÃÃö.

Â óñëîâèÿõ îäíî÷àñòîòíûõ íàáëþäåíèé âîçíèêàåò íåîáõîäèìîñòü ïðèíåíåíèÿ ìåòîäà, ïîçâîëÿþùåãî ïîðääåëèòü èîíîñôåðíûé èíòåãðàë íà îñíîâå ýêñïåðèìåíòàëüíûõ äàííûõ î ñîñòîÿíèè èîíîñôåðû è ïàðàìåòðîâ îðáèòû êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà. Äëÿ ðåøåíèÿ äàííîé çàäà÷è ïðèìåíÿåòñÿ ìîäåëü îäíîñëîéíîé èîíîñôåðû, áàçèðóþùàÿñÿ íà ñëåäóþùèõ äîïóùåíèÿõ:

1. Âñ¼ ïîëíîå ñîäåðæàíèå ýëåêòðîíîâ ñîñðåäîòî÷åíî íà ïîðääëåííé âûñîòå ðàâíé 350 êì.

2. Ðàñ÷åò íàêëîííé çàäåðæêè:

   (a) Îïðåäåëåíèå âåðòèêàëüíîé çàäåðæêè â òî÷êå ïåðåñå÷åíèÿ ëó÷à ñ èîíîñôåðíûì ñëîåì (Ionospheric Pierce Point) ñì ðèñ. 2.4.

   (b) Ïðèìåíåíèå êàðòèðóþùåé ôóíêöèè äëÿ âû÷èñëåíèÿ èñêîìîé âåëè÷èíû.

   (c) Ó÷åò ãåîìåòðè÷åñêèõ ïàðàìåòðîâ ðàñïðîñòðàíåíèÿ ñèãíàëà.

Òàêèì îáðàçîì, íàêëîííàÿ çàäåðæêà âû÷èñëÿåòñÿ èç âåðòèêàëüíîé çàäåðæêè â ïîäèîíîñôåðíîé òî÷êå (Ionospheric Pierce Point), ò.å. ïåðåñå÷åíèå

ëó÷à ñ èîíîñôåðíûì ñëîåì íà âûñîòå 350 êì ïóòåì óìíîæåíèÿ íà êîýô-ôèöèåíò íàêëîíà.

Ðèñ. 2.4: Çåíèòíûé óãîë è ïîä-èîíîñôåðíàÿ òî÷êà

Êîýôôèöèåíò íàêëîíà (h - âûñîòà èîíîñôåðíîãî ñëîÿ):

$$F = 1 \quad \frac{R_{Earth}}{R_{Earth} + h} \cos E \quad {}_2! \quad {}^{1=2}; \qquad (2.16)$$

ãäåE - óãîë ìåñòà ñïóòíèêà, R_{Earth} - ðàäèóñ Çåìëè.

$$Ion_{vert} = \frac{40:3}{f^2 c} \quad VTEC; \qquad (2.17)$$

ãäå VTEC - ýòî âåðòèêàëüíûé TEC. Ôîðìóëà äëÿ ïåðåõîäà îò âåðòèêàëüíîé çàäåðæêè ê íàêëîííîé çàïèñûâàåòñÿ ñ èñïîëüçîâàíèåì êàðòèðóþùåé ôóíêöèè 2.16 è VTEC:

$$Ion_{slant} = \frac{40:3}{f^2 c} \quad VTEC \quad F(E); \qquad (2.18)$$

Äëÿ ïåðåõîäà ê ÷àñòîòíîé çàäåðæêå íåîáõîäèìî ïðîäèôôåðåíöèðîâàòü (2.18) ïî âðåìåíè:

$$\frac{f}{f} = \frac{40:3}{f^2 c} \quad \frac{dVTEC}{dt} \quad F(E) + \frac{40:3}{f^2 c} \quad VTEC \quad \frac{dF(E)}{dt}; \qquad (2.19)$$

ãäåE - óãîë ìåñòà ÊÀ, c - ñêîðîñòü ñâåòà, f - íîìèíàëüíàÿ ÷àñòîòà ñèãíàëà.

Ïðè ðàñ÷åòå èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ïî ìîäåëè òîíêîé îäíîñëîéíîé èîíî-ñôåðû ìîæíî âûäåëèòü äâà ÷ëåíà, êîòîðûå ñâÿçàíû ñî ñòàòè÷åñêèìè âà-ðèàöèÿìè ñàìîé ñðåäû ðàñïðîñòðàíåíèÿ (ìåäëåííûå) è äèíàìè÷åñêèìè âà-ðèàöèÿìè, ñâÿçàííûìè ñ äâèæåíèåì ÊÀ ïî îðáèòå.

Ðèñ. 2.5: Ïîä-èîíîñôåðíûå òî÷êè, èëëþñòðàöèÿ âåðòèêàëüíîé è íàêëîííîé çàäåðæêè

Äëÿ ó÷åòà ñòàòè÷åñêîãî ÷ëåíà âàæíî çíàòü ïàðàìåòð TEC. Äëÿ åãî íà-õîæäåíèÿ ñóùåñòâóþò ñëóæáû GNSS (Global Navigation Satellite System), êîòîðûå äàþò èíôîðìàöèÿ î ðàñïðåäåëåíèè TEC â âèäå èîíîñôåðíûõ êàðò [58].

Íèæå ïðåäñòàâëåíî ïðîñòðàíñòâåííîå ðàñïðåäåëåíèå TEC ñ èñïîëüçîâàíèåì èîííîñôåðíûõ êàðò UQRG. Ïîìèìî ýòîãî ñóùåñòâóþò êàðòû ROBR, IGRG, EHRG. Äëÿ èõ ñðàâíèòåëüíîãî àíàëèçà âîñïîëüçóåìñÿ ñåàíñîì GPS 4 äåêàáðÿ 2016 ãîäà 11:00-11:40 ñî ñòàíöèè Ýôôåëüñáåðã.

Ðèñ. 2.6: ñåàíñ 29.09.2016 15:00 UT

Ðèñ. 2.7: 29.09.2016 19:00 UT

Ðèñ. 2.8: 30.09.2016 02:00 UT

Ðèñ. 2.9: 30.09.2016 7:00 UT

Ðèñ. 2.10: Íà ðèñóíêàõ âèäíû ñóòî÷íûå âàðèàöèè VTEC, âûçâàííûå èîíèçàöèåé è ðåêîìáèíàöèåé â èîíîñôåðå

Íà ðèñ. 2.11 âèäíî óâåëè÷åíèå îòíîñèòåëüíîãî ñäâèãà çà ñ÷åò íàðàñòàíèÿ ýëåêòðîííé ïëîòíîñòè.

Â ìåòîäîëîãèè ïîðåäåëåíèÿ èîííîñôåðíé ïîïðàâêè êëþ÷åâûì çíà÷åíèåì îáëàäàåò ïàðàìåòð çåíèòíîãî óãëà êîñìè÷åñêîãî àïïàðàòà, êîòîðûé ïîðåäåëÿåòñÿ íà îñíîâå äàííûõ íàçåìíûõ ñòàíöèé ñëåæåíèÿ è ðåêîíñòðóèðîâàííé îðáèòû ÊÀ.

Ðèñ. 2.11: Ñðàâíåíèå ðåçóëüòàòà âû÷èñëåíèÿ îòíîñèòåëüíîãî èíîíñôåðíîãî ñäâèãà ïî êàðòàì UQRG, ROBR, IGRG, EHRG

Çíàÿ ïàðàìåòðû TEC èç êàðò UQRG, óãëà ìåñòà è êîîðäèíàòû ÍÑÑ ¾Ïóùèíî¿, ìû âû÷èñëèëè èíîíñôåðíûé ñäâèã äëÿ ñåàíñîâ 29-30 ñåíòÿáðÿ 2016 ãîäà íà ðèñ. 2.13 è ðèñ. 2.12.

Ðèñ. 2.12: Îòíîñèòåëüíûé èíîíñôåðíûé ñäâèã, ïîëó÷åííûé îäíî÷àñòîòíûì ðåæèìîì äëÿ íåñóùåé ÷àñòîòû 8.4 ÃÃö, ñåàíñ 29.09.2016 15:05-15:35

Ðèñ. 2.13: Îòíîñèòåëüíûé èíîíñôåðíûé ñäâèã, ïîëó÷åííûé îäíî÷àñòîòíûì ìåòîäîì äëÿ íåñóùåé ÷àñòîòû 8.4 ÃÃö, ñåàíñ 29.09.2016 19:05-19:42

Ðèñ. 2.14: Îòíîñèòåëüíûé èíîíñôåðíûé ñäâèã, ïîëó÷åííûé îäíî÷àñòîòíûì ìåòîäîì äëÿ íåñóùåé ÷àñòîòû 8.4 ÃÃö, ñåàíñ 30.09.2016 02:45-03:22

Àíàëèç ðåçóëüòàòîâ èçìåðåíèÿ èîíîñôåðíîãî ñäâèãà, ïîëó÷åííûõ äâóìÿ ìåòîäàìè (ñ èñïîëüçîâàíèåì êîìáèíàöèè äâóõ ÷àñòîò è ñ èñïîëüçîâàíèåì èîíîñôåðíûõ êàðò â îäíî÷àñòîòíîì ðåæèìå), ïîêàçàë, ÷òî èìåòñÿ ñóùåñòâåííîå ðàñõîæäåíèå íà 2 ïîðÿäêà (â îòí.åäèíèöàõ): 10^{12} - ñ èñïîëüçîâàíèåì ýôôåêòà äèñïåðñèè è èçìåðåíèÿ â êîìáèíàöèè ÷àñòîò, è 10^{14} - â îäíî÷àñòîòíîì ðåæèìå ñ èñïîëüçîâàíèåì èîíîñôåðíûõ êàðò. Ïðè÷èíà îòñóòñòâèÿ ñîãëàñîâàíèÿ ìîæåò áûòü â êà÷åñòâå ïîëó÷àåìîé ñ àïïàðàòíîãî êîìïëåêñà ÍÑÑ ÷àñòîòû, ëèáî â òîì, ÷òî ìîäåëü, îñíîâàííàÿ íà äâóõ÷àñòîòíé êîìïåíñàöèè, èìååò íåäîñòàòêè. Äëÿ òîãî, ÷òîáû äîñòîâåðíî íàéòè ïðè÷èíó ðàñõîæäåíèÿ, íåîáõîäèìî áûëî ïðèìåíèòü îáà ìåòîäà äëÿ äðóãèõ ñïóòíèêîâ. Íàèáîëåå ïîäõîäÿùèì îêàçàëèñü ñïóòíèêè GPS è GLONASS, òàê êàê èìåëàñü îáøèðíàÿ íàçåìíàÿ ñåòü ñëåæåíèÿ ñ îòêðûòûì äîñòóïîì ê äàííûì ñî ñïóòíèêà.

Ïðåæäå ÷åì ïåðåéòè ê âû÷èñëåíèþ èîíîñôåðíîãî ñäâèãà ÷àñòîòû äëÿ GPS, êðàòêî ðàçúÿñíèì ôîðìàò ïðåäñòàâëåíèÿ äàííûõ.

Äàííûå îò GPS ïðåäñòàâëÿþòñÿ â ôîðìàòå RINEX (Receiver Independent Exchange Format) [57]. Îñíîâíûå íàáëþäàòåëüíûå âåëè÷èíû:

- Èçìåðåíèå ôàçû íåñóùåé íà îäíîé èëè îáåèõ íåñóùèõ (ôàêòè÷åñêè ÿâëÿþùååñÿ èçìåðåíèåì ÷àñòîòû áèåíèé ìåæäó ïðèíÿòîé íåñóùåé ÷àñòîòîé ñïóòíèêîâîãî ñèãíàëà è ñãåíåðèðîâàííîé ýòàëîííîé ÷àñòîòîé ïðèåìíèêà).
- Èçìåðåíèå ïñåâäîäàëüíîñòè (êîäà), ýêâèâàëåíòíîå ðàçíîñòè âðåìåíè ïðèåìà (âûðàæåííîãî âî âðåìåííîì èíòåðâàëå ïðèåìíèêà) è âðåìåíè ïåðåäà÷è (âûðàæåííîãî âî âðåìåííîì èíòåðâàëå ñïóòíèêà) îòäåëüíîãî ñïóòíèêîâîãî ñèãíàëà.
- Âðåìÿ íàáëþäåíèÿ, ÿâëÿþùååñÿ ïîêàçàíèåì ÷àñîâ ïðèåìíèêà â ìîìåíò èçìåðåíèÿ ôàçû íåñóùåé è/èëè èçìåðåíèé êîäà.

Äàííûå ñîñòîÿò èç òðåõ òèïîâ ôàéëîâ ASCII (American standard code for information interchange). Êàæäûé òèï ôàéëîâ ñîñòîèò èç ðàçäåëà çàãîëîâêà è ðàçäåëà äàííûõ. Íàáëþäåíèÿ GNSS âêëþ÷àþò â ñåáÿ òðè ôóíäàìåíòàëüíûå âåëè÷èíû, êîòîðûå äîëæíû áûòü ïîðåäåëåíû: âðåìÿ, ôàçà è äèàïàçîí ðàññòîÿíèÿ.

- Âðåìÿ èçìåðåíèÿ - ýòî âðåìÿ ïðèåìà ïîëó÷åííûõ ñèãíàëîâ. Ýòî âðåìÿ èäåíòè÷íî äëÿ èçìåðåíèé ôàçû è äàëüíîñòè è îáùåå äëÿ âñåõ ñïóòíèêîâ, íàáëþäàâøèõñÿ â òó ýïîõó. Äëÿ ôàéëîâ äàííûõ îäíîé ñèñòåìû ïî óìîë÷àíèþ îíî âûðàæàåòñÿ â ñèñòåìå âðåìåíè ñîîòâåòñòâóþùåé ñïóòíèêîâîé ñèñòåìû.
- Ïñåâäîäàëüíîñòü - ýòî ðàññòîÿíèå îò àíòåííû ïðèåìíèêà äî àíòåííû ñïóòíèêà, âêëþ÷àÿ ñìåùåíèÿ ÷àñîâ ïðèåìíèêà è ñïóòíèêà (è äóãèå îòêëîíåíèÿ, òàêèå êàê àòìîñôåðíûå çàäåðæêè).
- Ôàçà - íåñóùàÿ ôàçà, èçìåðåííàÿ â öåëûõ öèêëàõ. Íàáëþäàåìûå çíà÷åíèÿ íå êîððåêòèðóþòñÿ ñ ó÷åòîì âíåøíèõ âîçäåéñòâèé, òàêèõ êàê: àòìîñôåðíàÿ ðåôðàêöèÿ, ñìåùåíèÿ ñïóòíèêîâûõ ÷àñîâ è ò.ä.

Íà îñíîâàíèè çàðåãèñòðèðîâàííé ÷àñòîòû ïðèíèìàåìîãî ñèãíàëà, íîìèíàëüíûõ ÷àñòî GPS-ñèãíàëîâ (L1 = 1,57542 ÃÃö è L2 = 1,2276 ÃÃö),