

УДК 528.31

В.М. Колгунов, В.О. Літинський
 Національний університет “Львівська політехніка”

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПЛАНОВОЇ МЕРЕЖІ БЕРЕЖАНСЬКОГО НАВЧАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧНОГО ПОЛІГОНА

© Колгунов В.М., Літинський В.О., 2001

Технико-историческое эссе, посвящённое этапам развития (1969 – 2000) плановой сети Бережанского геодезического полигона – базового центра летних учебных практик студентов геодезического факультета Национального университета “Львовская политехника”.

The technical and historical essay devoted to the stages of development (1969 – 2000) of the plane network of the Berezhany geodesic polygon – the base centre of the summer educational practice for the Geodetic faculty students (National university “Lviv Polytechnic”).

Ухвалою Тернопільського облвиконкому №711 від 28 жовтня 1968 р. “Львівській політехніці” було виділено у постійне користування ділянку землі площею близько 4 га на північно-східній околиці м. Бережани для будівництва бази навчального геодезичного полігона.

Улітку 1968 р. відбулася перша навчальна геодезична практика студентів-політехніків на теренах Бережанщини. Сьогодні база практики – місце з налагодженою інфраструктурою автономного функціонування з дорогами, 4-поверховим гуртожитком, їдальнею, клубом, лазнею, астрономічним та спортивним майданчиками.

Планова геодезична мережа Бережанського навчального полігона складається з пунктів опорної мережі, аналітичних пунктів (АП) та пунктів полігонометрії (4 класу і розрядної). Історія розвитку опорної планової геодезичної мережі полігона налічує три періоди. У I періоді (1969 – 1982 рр.) координати пунктів визначено методом тріангуляції (рис. 1); масштабування та орієнтування мережі здійснено включенням до неї існуючих пунктів державної тріангуляції 2–4 класів. Закладування центрів, побудову зовнішніх геодезичних знаків, спостереження та опрацювання вимірювань мережі виконано АГП-13 (Експедиція 243, м. Житомир). Каталог робочих координат пунктів мережі цієї епохи видано для користувачів в умовній системі без повороту осей координат. Сучасний аналіз мережі I періоду вказує на суттєву неоднорідність її планової точності: відносні похибки довжин ліній лежать у межах 1:10000–1:420000, в середньому близько 1:40000.

Опорна мережа I періоду відіграла важливу роль у створенні полігонометричної мережі полігона. У 1973 р. геодезичним факультетом (ГФ) “Львівської політехніки” було організовано наукову геодезичну експедицію (начальник експедиції – асистент Б.Т. Тлустяк) у складі викладачів і лаборантів кафедри геодезії, а також студентів 2-го курсу ГФ. Керівники загонів експедиції – доценти П.І. Конюхов та Р.С. Сидорик, ст. викладач І.С. Тревого та асистенти З.Ф. Патова і Б.Т. Тлустяк. Експедицією за час літньої геодезичної практики було прокладено 5 (за кількістю загонів) полігонометричних ходів 1-го розряду підвищеної точності (1:20000–1:25000). Загалом було закладено близько 65 геодезичних центрів; кутові вимірювання у ходах виконано теодолітами типу Т2; лінійні вимірювання – прокомпарованими мірними дротами. Загальна довжина ходів – близько 20 км. Створеною полігонометричною мережею охоплено практично всю територію полігона. У наступні роки мережу доповнювали новими пунктами – як замість втрачених,

так і для прокладування нових полігонометричних ходів. Розпочинаючи з кінця 1970-х років, лінійні вимірювання виконували світловіддалемірами МСД-1М, 2СМ-2 і СТ-5, а з 1999 р. – електронними тахеометрами ТС 403L фірми Leica. Вимірювання горизонтальних кутів у ходах виконували теодолітами Т2, 2Т2, Theo 010 і Theo 010В. Можна стверджувати, що для сучасної епохи координати пунктів полігонометричної мережі Бережанського геодезичного полігона визначено з точністю, що відповідає вимогам до полігонометрії 4 класу. Створена й оновлена полігонометрична мережа є важливою базою для виконання програм навчальних практик студентами 1-го та 2-го курсів геодезичного факультету.

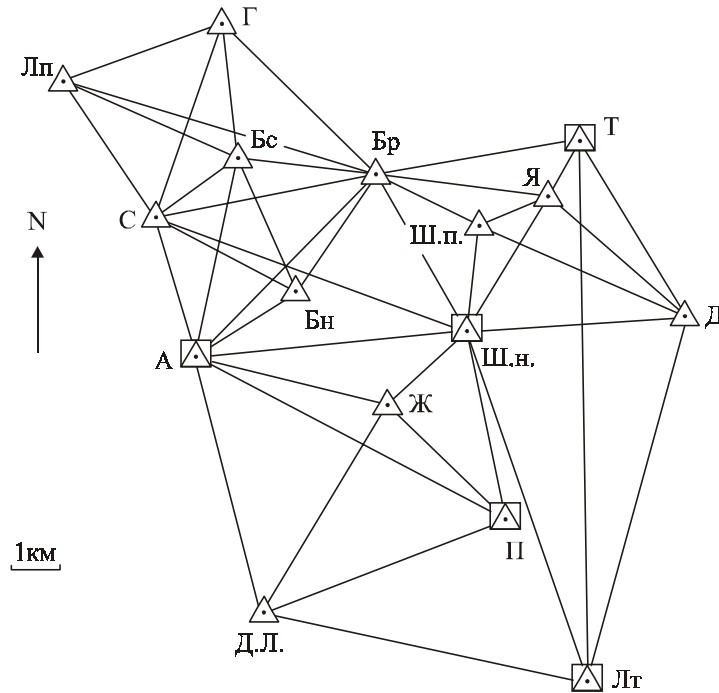


Рис.1. Схема планової опорної мережі Бережанського геодезичного полігона (I період)

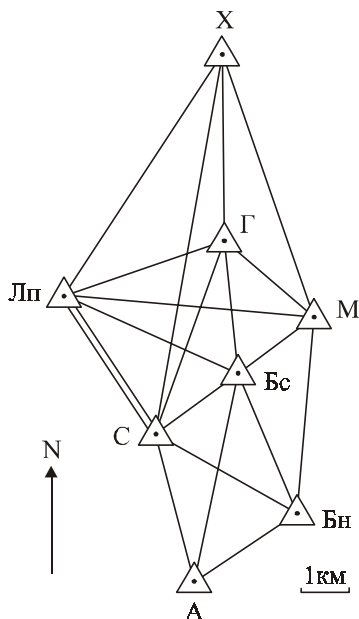


Рис.2. Схема мережі триангуляції 1982–83 рр. Бережанського геодезичного полігона (II період)

Модернізацію планової опорної геодезичної мережі I періоду розпочато у 1981 р. під керівництвом проф. А.Л. Островського. Цього ж року науковою експедицією ГФ – викладачами кафедри геодезії та студентами 2-го курсу – рекогностовано мережу, визначено місця закладування нових пунктів мережі М і Х (рис. 2), а також побудовано нові – стійкіші й вищі – зовнішні геодезичні знаки: на заміну існуючих 4-гранних пірамід (металевий кутник) заввишки 4–5 м на пунктах полігона було встановлено 3-гранні трубчаті піраміди заввишки 6–7 м.

Планову опорну мережу II періоду (1982–1999 рр.) створювали як вільну мережу за класичною схемою побудови триангуляції. Масштабування мережі було здійснено вимірюванням вихідної сторони С – Лп (рис.2) радіовіддалеміром РДГВ. Спостереження мережі (8 пунктів) виконано протягом двох польових сезонів – під час навчальних практик 1982–1983 рр. Горизонтальні кути вимірювали теодолітом Т05 методом Шрайбера (у всіх комбінаціях) згідно з програмою кутових вимірювань у

мережах 1 класу триангуляції. Спостереження виконували виключно у періоди спокійних зображень та близькі до них періоди, переважно під час вечірньої видноти. Слід зазначити ретельність виконання кутових вимірювань асистентами кафедри геодезії В.І. Мухомою, О.Й. Дрбалом, В.М. Колгуновим.

Оцінку польових вимірювань здійснено за кутовими нев'язками, отриманими у 41 трикутнику мережі. Значення цих нев'язок від $-2,94''$ до $+2,51''$. Середню квадратичну похибку виміряних кутів обчислено за формулою Фереро: $m_{\beta_{вим}} = 0,81''$. Контроль кутових вимірювань виконано за вільними членами полюсних умовних рівнянь, що виникають у мережі (розглянуто 26 умов полюса). Цей критерій точності також не перебільшував допустимих значень. Вирівнювання кутових вимірів триангуляційної мережі II періоду виконано параметричним методом. Внутрішній аналіз результатів вирівнювання виявив таке.

1. Відносні похибки m_s/S довжин ліній мережі знаходяться у межах 1:191000–1:685000.

2. Середні квадратичні похибки m_α дирекційних кутів ліній мережі – у межах $0,31 - 0,66''$.

Після опрацювання матеріалів GPS-визначень (1999 р.) координат пунктів основної частини опорної мережі полігона (рис. 3) стало можливим оцінити зовнішню вірогідність елементів триангуляції, створеної у 1982 – 1983 рр. (планової опорної мережі II періоду). Розглянемо головні результати цієї оцінки.

I. Кутові вимірювання

Зовнішню надійність кутових вимірів триангуляції 1982 – 1983 рр. визначено порівнянням кутів цієї мережі з кутами, отриманими 1999 р. з GPS- визначень. Останні було обчислено за довжинами ліній – сторін трикутників мережі (рис. 3), – застосувавши під час обчислень відому формулу косинуса внутрішнього кута трикутника. Порівняння виконували за спільними кутами обох мереж (рис. 2, 3). При цьому горизонтальні кути β , отримані з опрацювання GPS-мережі, приймали за еталонні – $\beta_{ет}$. Середні квадратичні похибки цих кутів, згідно з результатами опрацювання GPS-спостережень, рідко перебільшували $0,10''$, що майже на порядок точніше від виміряних кутів ($m_{\beta_{вим}} = 0,81''$, за формулою Фереро) у опорній мережі II періоду. Тому різниці $\Delta\beta_1 = \beta_{вим} - \beta_{ет}$ виміряних і еталонних кутів вважалися під час оцінки точності за істинні похибки виміряних у

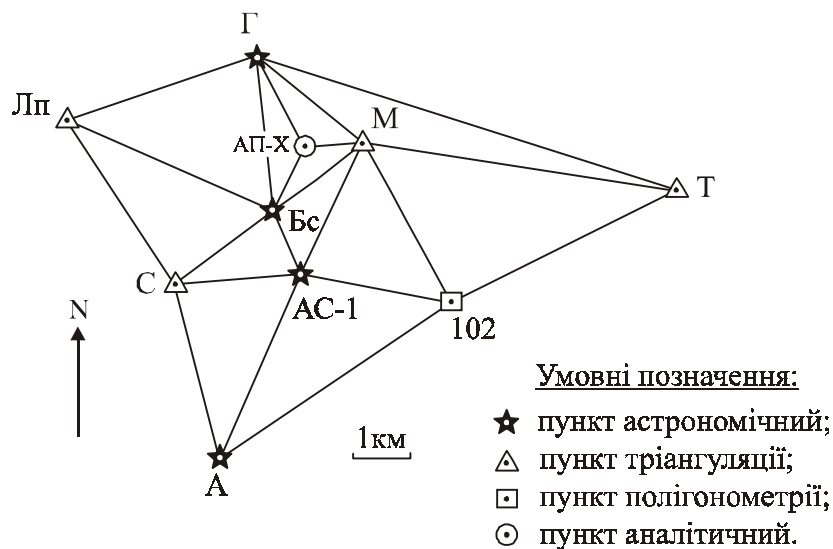
триангуляційній мережі кутів $\beta_{вим}$. Тоді, за формулою Гавсса, $M_{\beta_{вим}} = \sqrt{\frac{[(\Delta\beta_1)^2]}{n}}$. Незалежно оцінили точність вирівняних горизонтальних кутів мережі – $\beta_{вир}$, отриманих з вирівнювання триангуляційної мережі параметричним методом. Аналогічно наведеному

вище: $\Delta\beta_2 = \beta_{вир} - \beta_{ет}$; $M_{\beta_{вир}} = \sqrt{\frac{[(\Delta\beta_2)^2]}{n}}$. Фактичний матеріал з виконаної оцінки точності

подано у таблиці.

**Зовнішня оцінка точності
виміряних і вирівняних горизонтальних кутів
мережі Бережанського навчального геодезичного полігона**

№№ п/п	Кут	Триангуляція, 1982 – 1983 рр.			GPS-мережа, 1999 р.	Зовнішня оцінка	
		виміряні кути	вирівняні кути		еталонні кути	вимір. кути	вирівн. кути
		$\beta_{вим}$	$\beta_{вир}$	$m_{\beta_{вир}}$	$\beta_{ет}$	$\Delta\beta_1$	$\Delta\beta_2$
1	Г-Лп-М	23 ⁰ 07'16,79"	23 ⁰ 07'16,74"	0,34"	23 ⁰ 07'16,42"	+0,37"	+0,32"
2	М- Лп -С	51 50 06,78	51 50 06,25	0,44	51 50 06,70	+0,08	-0,45
3	Г- Лп -С	74 57 23,57	74 57 22,99	0,58	74 57 23,12	+0,45	-0,13
4	Лп -Г-С	51 58 08,03	51 58 07,34	0,47	51 58 07,08	+0,95	+0,26
5	С-Г-А	14 52 27,14	14 52 28,06	0,25	14 52 28,39	-1,25	-0,33
6	А-Г-М	55 08 52,66	55 08 52,35	0,44	55 08 53,17	-0,51	-0,82
7	Лп -Г-М	121 59 27,83	121 59 27,75	0,62	121 59 28,69	-0,86	-0,94
8	Г-М- Лп	34 53 15,32	34 53 15,51	0,40	34 53 14,89	+0,43	+0,62
9	Лп -М-С	41 33 11,06	41 33 11,75	0,33	41 33 11,24	-0,18	+0,51
10	С-М-А	29 13 26,43	29 13 26,81	0,30	29 13 27,08	-0,65	-0,27
11	Г-М-А	105 39 52,81	105 39 54,07	0,60	105 39 53,20	-0,39	+0,87
12	М-А-Г	19 11 14,84	19 11 13,57	0,23	19 11 13,58	+1,26	-0,01
13	Г-А-С	20 10 42,33	20 10 43,99	0,33	20 10 44,20	-1,87	-0,21
14	М-А-С	39 21 57,17	39 21 57,57	0,41	39 21 57,84	-0,67	-0,27
15	Лп -С-Г	53 04 29,77	53 04 29,65	0,44	53 04 29,80	-0,03	-0,15
16	Г-С-М	33 32 11,55	33 32 12,33	0,33	33 32 12,29	-0,74	+0,04
17	М-С-А	111 24 36,33	111 24 35,60	0,47	111 24 35,08	+1,25	+0,52
18	Лп -С-А	198 01 17,65	198 01 17,58	0,65	198 01 17,23	+0,42	+0,35



*Рис.3. Схема GPS-мережі 1999 р.
Бережанського геодезичного полігона (III період)*

З опрацювання даних таблиці отримано такі результати: $M_{\beta_{вим}} = \sqrt{\frac{12,42}{18}} = 0,83''$;

$M_{\beta_{вир}} = \sqrt{\frac{4,063}{18}} = 0,48''$. Як бачимо, зовнішня оцінка точності вимірюваних горизонтальних кутів у опорній плановій мережі II періоду повністю збігається з результатом, отриманим під час опрацювання вимірів триангуляції 1982 – 1983 рр. (за значеннями кутових нев'язок у трикутниках мережі). Значення $M_{\beta_{вир}}$ також підтверджує внутрішню точність вирівняних горизонтальних кутів цієї мережі (середнє квадратичне $m_{\beta_{вир}} = 0,44''$).

II. Лінійні вимірювання

Вище зазначалося, що вихідну сторону С – Лп триангуляційної мережі Бережанського геодезичного полігона виміряли радіовіддалеміром РДГВ: $S = 3485,025$ м (на площині Гавсса) – з відносною похибкою $\frac{m_s}{S} \cong \frac{1}{150000}$ (за внутрішнім погодженням вимірів). Значення довжини цієї лінії з GPS-вимірювань дорівнює 3485,078 м (з відносною похибкою 1:2703000). Отже, дійсна точність визначення вихідної сторони опорної мережі II періоду буде $\frac{\Delta S}{S} = \frac{0,053}{3485} \cong \frac{1}{65800}$. Цей результат слід визнати реальним, оскільки, з іншого боку, приладова точність вимірювання ліній РДГВ, згідно з рівнянням регресії $m_s = 50\text{мм} + 3 \cdot 10^{-6} S$, для даної лінії дорівнює ~ 61 мм, що відповідає відносній похибці $\frac{m_s}{S} = \frac{0,061}{3485} \cong \frac{1}{57100}$. Зрозуміло, що відносні похибки решти ліній опорної мережі II періоду будуть дещо гірші за отриману точність визначення вихідної сторони мережі $\left(\frac{m_{s_i}}{S_i} > \frac{1}{65800} \right)$. Порядок отриманої точності підтверджують і відносні похибки координат пунктів полігонометричних ходів 4 класу підвищеної точності, прокладених у 1985 – 1999 рр., які опиралися на пункти опорної мережі II періоду – в кращому випадку, ці похибки були в межах 1:40000 – 1:45000.

III. Орієнтування мережі

Триангуляцію 1982 – 1983 рр. опрацьовували як вільну мережу, тому орієнтування її було певною мірою довільним. Разом з тим, значення дирекційного кута вихідної сторони С – Лп мережі (рис. 2) було прийнято близьким до такого, що орієнтує планову мережу полігона у державній системі координат. Астрономічні визначення, виконані у опорній мережі полігона у наступні роки (див. далі), показали, що середнє значення поправки в орієнтування опорної геодезичної мережі II періоду $\Delta\alpha_0 = + 12,0''$ порівняно з вірогідним.

Завершенням розвитку планової опорної мережі II періоду можна вважати доповнення її чотирма новими пунктами триангуляції (на рис. 2 не позначено): Геополігон, сигн., Лісок, пір., Гайок, пір. та Стецьково, пір. Перший з них розташований на базі полігона, два наступні пункти – у західній частині, а останній – у північній частині полігона. Прив'язку цих пунктів до триангуляційної мережі II періоду виконано у вересні 1993 р. експедицією кафедри прикладної геодезії ГФ (начальник експедиції – асистент П.І Коваль). Середні квадратичні похибки M_H програм одночасного вимірювання напрямів (метод кругових прийомів) теодолітами УВК, ОТ-02 і ОТ-02М на 6 пунктах спостережень – у межах 0,44–1,56''.

31 липня 1999 р. відкрито наступну сторінку історії опорної планової мережі Бережанського навчального геодезичного полігона – розпочався III період її розвитку. Цього дня заходом викладачів кафедри геодезії та студентів-практикантів 2-го курсу ГФ із застосуванням GPS-технології було створено мережу (рис.3), основу якої склали пункти опорної мережі II періоду (за винятком пунктів Бн та X). До складу GPS- мережі було також включено аналітичний пункт АП-Х, астрономічний пункт АС-1 (база полігона), пункт Т державної триангуляції 2 класу та пункт 102 державної полігонометрії 4 класу (разом – 10 пунктів). Вимірювання мережі виконано GPS-приймачами 4600LS фірми Trimble; тривалість сесій спостереження становила 10 годин для пунктів базисної лінії С–Т, для решти пунктів мережі – 4 – 4,5 години.

Базисну лінію GPS-мережі утворили пункти С і Т державної триангуляції (відповідно 3 та 2 класів). Довжину її S_{GPS} визначено з відносною похибкою $\approx 1:7000000$ (внутрішня точність). Отримана розбіжність $\Delta S = S_{GPS} - S_{ТРИАНГ} = +0,041$ м (відносна похибка – 1:218000) відповідає точності цих класів державної триангуляції. Проте, перед остаточним математичним опрацюванням GPS- вимірювань мережі координати (х,у) пункту С переобчислили згідно з довжиною лінії S_{GPS} , як вірогіднішою. Орієнтування базисної лінії С–Т (разом з цим і всієї GPS- мережі) залишили незмінним, тобто в державній системі координат.

Опрацювання GPS-вимірювань опорної планової мережі полігона показало високу внутрішню точність отриманих результатів. Подамо їх.

1. Абсолютні похибки визначених прямокутних координат пунктів мережі не перебільшують проголошеної фірмою субсантиметрової точності ($M_x \leq 1,6$ мм; $M_y \leq 1,2$ мм).

2. Відносні похибки M_s / S визначених довжин ліній знаходяться у межах 1:700000–1:9280000, у середньому близько 1:2500000.

3. Середні квадратичні похибки M_α дирекційних кутів ліній мережі – у межах 0,03 – 0,27” (коротка лінія).

Остаточному орієнтуванню GPS-мережі Бережанського геодезичного полігона нами надано особливої уваги. Для цього використано результати високоточного визначення астрономічного азимута лінії А–Г (1984 р., виконавці – асистент В.М. Колгунов, аспірант М.П. Кулинич). Вірогідне значення цього азимута отримано астрономічним теодолітом АУ 2/10 з декількох програм незалежних визначень – візуальних (за годинним кутом Полярної – дві програми: 19 і 12 прийомів) та фотографічних спостережень (реєстрація проходжень зірок у визначуваному вертикалі). Середня квадратична похибка отриманого азимута $M_\alpha = 0,25$ ”. Під час обчислень азимута Лапласа напряму А–Г нами використано астрономічні координати (φ, λ) пункту А, визначені у різні роки різними виконавцями – асистентом П.І. Ковалем (1981 р., довгота), інженером І.С. Сидоровим (1981 р., широта), ст. викладачем О.С. Лавнікевичем (1984 р., широта). Точність цих результатів відповідає вимогам до астровизначень 1 класу.

Обчислений за результатами астрономічних спостережень дирекційний кут $\alpha_{А-Г}$ є вагомим і незалежним засобом контролю орієнтування отриманої GPS-мережі (при порівняннях його можна вважати еталонним). Різниця $\Delta\alpha = \alpha_{GPS} - \alpha_{АСТР}$ дирекційних кутів на пряму А–Г, отриманих з опрацювання GPS-мережі та з астровизначень (еталонний), характеризує зовнішню вірогідність орієнтування GPS-мережі полігона. В роботі отримано $\Delta\alpha = +2,08$ ”. Проаналізуємо цей результат.

У нашому випадку похибку M_α орієнтування GPS-мережі формують дві основні складові – похибка $m_A = 1,2''$ орієнтування державної астрономо-геодезичної мережі та похибка $m_a = 1'' + (5/S_{км})''$ визначення азимутів ліній у GPS-мережах (формулу рекомендовано фірмою Trimble). При $S_{A-Г} = 7,1 км$ отримуємо $m_a = 1,70''$, тоді $M_\alpha = \sqrt{m_A^2 + m_a^2} = 2,08''$. Отже, результати незалежних оцінок точності орієнтування GPS-мережі Бережанського геодезичного полігона збігаються. Отриману розбіжність $\Delta\alpha$ орієнтування GPS-мережі ліквідували загальним поворотом мережі на $2,08''$ проти годинникової стрілки, наново переобчисливши прямокутні координати всіх пунктів мережі (окрім п.Г), якими зафіксовано сучасний стан планової опорної мережі III періоду.

Якісні зміни на краще, що відбулися у плановій опорній мережі Бережанського геодезичного полігона після її модернізації 1999 р., покажемо на прикладах. У 2000 р. під час літньої навчальної практики трьома бригадами студентів 2-го курсу ГФ виконано повторні вимірювання трьох існуючих полігонометричних ходів 4 класу, вихідними для яких були пункти С, Бс, М, Г опорної мережі полігона. Для вимірювань використовували теодоліти Theo 010 і Theo 010В, а також електронні тахеометри ТС 403L. Під час опрацювання вимірювань вперше було використано нові значення координат вихідних пунктів з переобчисленого GPS-каталога 1999 р. Отримали такі результати:

а) у полігонометричному ході п.Бс–п.Г (довжина ходу $[S] = 3,40 км$, $n = 8$ ліній) відносна похибка обчислених координат пунктів $f_s / [S] = 1:162000$;

б) у полігонометричному ході п.Бс–п.М ($[S] = 2,75 км$, $n = 8$) – $f_s / [S] = 1:212000$;

в) у полігонометричному ході п.М–п.Г ($[S] = 3,60 км$, $n = 9$) – $f_s / [S] = 1:160000$.

Отримані відносні похибки у 4 – 5 разів менші від таких, що обчислені за вихідною плановою основою II періоду. Серед пунктів першого і третього з наведених полігонометричних ходів (приблизно в їх середині) знаходився пункт GPS-мережі АП-Х – як пересічний пункт ходу. Координати АП-Х, отримані зі строгого зрівноважування цих ходів, так відрізнялися від отриманих із GPS-визначень: $\delta x = -3 мм$, $\delta y = -2 мм$ (для першого ходу); $\delta x = +1 мм$, $\delta y = +4 мм$ (для третього ходу).

До сучасного періоду розвитку Бережанського навчального геодезичного полігона належить також створення у 1999-2000 рр. взірцевого базису другого розряду для еталонування світловіддалемірів, рулеток та землемірних стрічок, а фазова його частина може бути використана для еталонування GPS-станцій.