

К.Р. Третяк, І.Б. Романишин, Ю.І. Голубінка  
 Національний університет "Львівська політехніка"

## ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ ФАЗОВОГО ЦЕНТРА АНТЕНИ GPS-ПРИЙМАЧА

© Третяк К.Р., Романишин І.Б., Голубінка Ю.І., 2002

Разработана методика определения эксцентриситета фазового центра антенн GPS-приемников, которая дает возможность вносить поправку в GPS-измерения за несовпадение фазового центра антенны с ее осью вращения. Эта методика повышает точность и усовершенствует процесс обработки GPS-измерений.

The technique of definition eccentricity of the phase centre of aeriels of GPS-receivers is developed which allows to bring in the amendment to GPS-measurements for discrepancy of the phase centre of the aerial with its axis of rotation. The given technique raises accuracy and will improve process of processing of GPS-measurements.

Відомо, що на точність визначення координат геодезичних пунктів супутниковими радіонавігаційними системами впливають групи факторів, які відповідно визначаються :

- якістю роботи GPS-супутників;
- середовищем, через яке проходять GPS-сигнали;
- методикою спостережень;
- інструментальними похибками GPS-приймачів.

Інформація про якість роботи супутника міститься в навігаційному повідомленні GPS-сигналу. Вплив наступних двох факторів можна коригувати під час планування, проведення та обробки вимірів. У сучасних GPS-приймачах тестування їх роботи виконується в автоматичному режимі. Відповідно користувачі GPS- приймачів позбавлені можливості оцінки та корекції величин похибок, спричинених останньою групою факторів.

Проте на основі експериментальних досліджень нами встановлено, що результати високоточних вимірів, виконаних GPS-приймачами фірми "LEICA", є спотворені зсувом фазового центра супутникової антени відносно осі її обертання. Встановлено, що ця величина може сягати кількох міліметрів. Зрозуміло, що виконання прецизійних GPS-вимірів субміліметрової точності вимагає врахування цих спотворень. Інструкції експлуатації GPS-приймачів рекомендують при вимірах орієнтувати у північному напрямку відповідну мітку антен приймачів, що дозволить уникнути похибки зсуву фазових центрів, за умови тотожності лінійних та кутових величин эксцентриситету фазових центрів усіх антен, які беруть одночасну участь у вимірах. Однак малоймовірно, що технологічно під час збирання антен можна забезпечити однакові положення фазових центрів усіх антен однакової марки відносно осі їх обертання. У такому разі эксцентриситет раціональніше технологічно звести до нуля. Відповідно при застосуванні у вимірах тільки двох приймачів орієнтація антен на північ перетворює похибки зсуву фазових центрів у мережах із випадкових у систематичні, що спотворює масштаб мережі. При застосуванні кількох приймачів ці похибки частково перетворюються в систематичні.



Величина ексцентриситету фазового центра залежить від багатьох факторів, наприклад:

- схеми під'єднання живлення до чутливого елемента антени;
- умов експлуатації приймачів;
- технологічних ремонтів;
- орієнтації супутників відносно приймача під час вимірів.

У спеціальній літературі та мережі INTERNET практично відсутня інформація про технологію корекції положення фазового центра в заводських умовах. Очевидно фірми виробники GPS-апаратури вважають цю інформацію комерційною таємницею.

Однак користувачі GPS-приймачів перед виконанням прецизійних вимірів повинні мати інформацію про ексцентриситет фазового центра. Нами запропоновано методику визначення лінійної та кутової величини ексцентриситету фазового центра антени. Розроблена методика подібна до способу визначення ексцентриситету аліади прецизійних теодолітів.

Так при наявності ексцентриситету фазового центра, поступово розвертаючи антену навколо осі обертання на певний кут, описуємо фазовим центром коло радіусом, що дорівнює лінійній величині ексцентриситету.

Виконуючи виміри у рівномірно рознесених по колу положеннях, отримуємо координати точок, які описують це коло. За ними можемо визначити лінійну і кутову величину ексцентриситету фазового центра.

З урахуванням поданої інформації та практичного досвіду ми рекомендуємо таку методику визначення зсуву фазового центра антени супутникового радіонавігаційного приймача:

1. Перед визначенням зсуву фазового центра антени необхідно проводити прогнозування спостережень (прогнозування видимості супутників).

2. Спостереження необхідно проводити у сприятливий для вимірів час, коли коефіцієнт GDOP < 4, та особливо уникаючи різких змін цього коефіцієнта в той чи інший бік, при цьому кількість видимих супутників повинна бути постійною, а їх мінімальна кількість не повинна бути меншою 5.

3. Досліджувана антена з приймачем встановлюється на відстані не більше ніж 10 м від референційної станції.

4. Спостереження рекомендується проводити методом “Стій-йди” (“Stop-go”) з частою фіксації епох, що дорівнює 5 с, обмеженням супутників по горизонту, що дорівнює 15 градусам та тривалістю спостережень 10 – 20 хв на кожній точці.

5. Ініціалізація ланцюга вимірів проводиться від 10 до 15 хв.

6. Після проведення ініціалізації підставка антени залишається у нерухомому положенні, а сама антена послідовно повертається за годинниковою стрілкою на певний кут і в кожному з цих положень виконуються вимірювання з обов'язковим замиканням на початкове положення. Сукупність цих операцій становить один прийом. Для другого прийому аналогічні дії проводяться у зворотному порядку проти годинникової стрілки.

7. Кут розвороту антени  $\alpha$  рекомендується вибирати за програмою, наведеною у табл. 1.

8. Обробка спостережень виконується з обов'язковим суміщенням початкової та кінцевої точок вимірів.

9. Повна програма визначення ексцентриситету фазового центра антени передбачає проведення чотирьох прийомів. Розбіжності у визначених із різних прийомів лінійних величинах ексцентриситету  $l$  не повинні перевищувати 2 мм, а між кутовими елементами допустима розбіжність не повинна перевищувати  $\alpha/\sqrt{2}$ .

**Рекомендовані кути повороту антени для визначення ексцентриситету фазового центра антени GPS-приймача**

Очікуваний зсув $e$ фазового центра антени (мм)	Кут розвороту антени $\alpha$ (градуси)
2	60
3	40
5	20
10	10
15	6
20	5

Розрахунок величин кутів повороту антени проведено на основі апріорно відомої наближеної лінійної величини ексцентриситету  $e$ . При цьому лінійна та кутова похибки визначення ексцентриситету повинні бути еквівалентні, що визначається виразом

$$\frac{m_e}{e} = \frac{m_\alpha}{\rho} \quad (1)$$

Приймаючи за результатами експериментальних досліджень похибку визначення лінійної величини ексцентриситету  $m_e = 2$  мм, кут розвороту антени  $\alpha$  дорівнює  $m_\alpha$ , за виразом (1) визначаємо рекомендовані кути розвороту антени залежно від очікуваної лінійної величини фазового центра  $e$ .

З метою перевірки вищенаведеної методики визначення зсуву фазового центра антени приймача супутникових радіонавігаційних сигналів нами було проведено серію спостережень на території астрономічної обсерваторії Національного університету “Львівська політехніка”. Згідно з представленою методикою було проведено дослідження супутникової геодезичної антени AT-302 GPS-приймача фірми LEICA. У зв’язку з тим, що лінійна величина зсуву фазового центра була невідома, то апріорно кут розвороту антени було прийнято таким, що дорівнює 45 градусів. З метою визначення азимута ексцентриситету фазового центра орієнтація антени на північ та повертання антени на задані кути проводились за допомогою бусолі.

Усі результати GPS-вимірів у восьми прийомах було опрацьовано програмним пакетом SKI фірми LEICA і отримано координати всіх визначених точок кола, яке описує лінійний ексцентриситет фазового центра навколо осі обертання антени. Координати точок є трансформовані на площину горизонту.

У табл. 2. подано координати восьми точок, визначених у результаті проведення вимірів одним прийомом. Для визначення лінійної величини ексцентриситету фазового центра складаємо для кожної визначеної точки рівняння такого вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} (X_1 - X_{onm})^2 + (Y_1 - Y_{onm})^2 - e_{onm}^2 = v_1 \\ \dots \\ (X_n - X_{onm})^2 + (Y_n - Y_{onm})^2 - e_{onm}^2 = v_n \end{array} \right. \quad (2)$$



де  $X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_n$  – координати визначених точок;  $X_{onm}, Y_{onm}, e_{onm}$  – координати центра та радіус оптимального кола, яке описує положення визначених точок на площині;  $v_i$  – невідомі поправки;  $n$  – кількість визначених точок.

Таблиця 2

**Результати визначення ексцентриситету фазового центра антени  
GPS-приймача (прийм № 1)**

№№ точок	Координати		$e$ (мм)	$(e_i - e_{onm})^2$	$\alpha^0$	$A^0$	$\Theta^0$	$(\Theta_{сер} - \Theta_i)$
	$X$ (мм)	$Y$ (мм)						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	7,4	13,3	3,4	1,69	0	117	117	9
2	3,5	13,2	6,1	1,96	45	152	107	49
3	8,2	5,0	5,4	0,49	90	261	171	3249
4	9,6	6,3	4,1	0,36	135	278	143	841
5	10,0	8,1	2,4	5,29	180	292	112	4
6	15,8	7,8	7,3	6,76	225	339	114	0
7	14,8	10,3	5,8	1,21	270	360	90	576
8	11,6	11,1	2,7	4,00	315	17	62	2704
Опт.	9,0	10,3	$e_{onm} = 4,7$ мм	$m_e = 1,7$ мм	$\Theta_{сер} = 114^0$		$m_\Theta = 33^0$	

Для визначення параметрів оптимального кола розв'яжемо систему рівнянь (2) за умови

$$\sum v^2 = \min. \quad (3)$$

Розв'язування системи рівнянь (2) за умови (3) зручно виконувати у прикладних пакетах, які дозволяють мінімізувати задану функцію при накладанні у вигляді рівнянь умов на змінні. До таких пакетів належать (EXCEL, QUATTRO-PRO, MATHCAD, MATLAB та інші). Для розв'язування цієї задачі за даними табл. 2 використано пакет QUATTRO-PRO (функція – optimizer). В останньому рядку табл. 2 наведено значення  $X_{onm}, Y_{onm}, e_{onm}$ . Далі знаходимо відстані від визначених точок до центра кола

$e_i = \sqrt{(X_i - X_{onm})^2 + (Y_i - Y_{onm})^2}$ . Ці величини наведені у табл. 2. Тепер знаходимо середню квадратичну похибку визначення лінійної величини ексцентриситету

$$m_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{onm})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}. \quad (4)$$

За даними прийому № 1 лінійна величина ексцентриситету  $e = 4,7$  мм, а середня квадратична похибка її визначення  $m_e = 1,7$  мм (табл. 2).

У табл. 2 у стовпці  $\alpha$  представлено для усіх вимірних точок величини кутів розвороту антени відносно напрямку на північ. У наступному стовпці обчислено за координатами  $X_{onm}, Y_{onm}, X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_n$  азимуту напрямків  $A$  із визначеного центра кола на вимірні точки. Тепер знаходимо кутову величину ексцентриситету фазового центра за вимірами на кожен точку за формулою

$$\Theta_i = A_i - \alpha_i. \quad (5)$$

Середнє значення  $\Theta_{\text{сеп}} = 114^{\circ}$ . Далі знаходимо середню квадратичну похибку визначення  $\Theta_{\text{сеп}}$  за виразом

$$m_{\Theta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Theta_{\text{сеп}} - \Theta_i)^2}{n-1}}. \quad (6)$$

За даними табл. 2  $m_{\Theta} = 33^{\circ}$ .

На рис. 1 графічно зображено за результатами вимірів розташування положення точок фазового центра внаслідок послідовного обертання антени на заданий кут. Тут же нанесено оптимальне коло обертання фазового центра навколо осі антени.

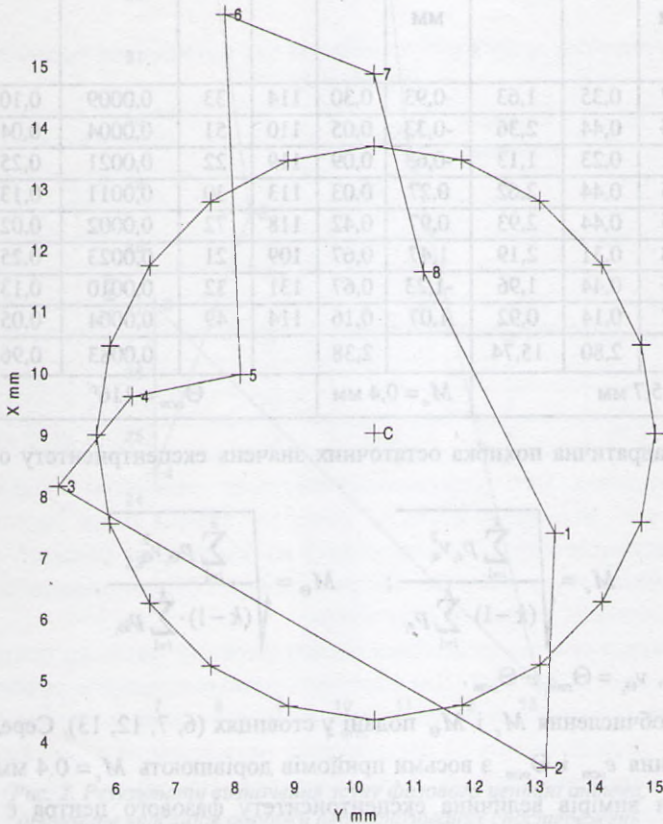


Рис. 2. Результати визначення зсуву фазового центра антени (прийм № 1)

У табл. 3 (стовпці 2, 3, 8, 9) представлено результати визначення ексцентриситету фазового центра антени 8-ми прийомами. Знайдемо середньозважене значення лінійної та кутової величини ексцентриситету за виразами

$$e_{\text{осм}} = \frac{\sum_{i=1}^k P_{e_i} \cdot e_{\text{осм}_i}}{\sum_{i=1}^k P_{e_i}}; \quad \Theta_{\text{осм}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{\Theta_i} \cdot \Theta_i}{\sum_{i=1}^m P_{\Theta_i}} \quad (7)$$



де  $k$  – кількість виконаних прийомів;  $p_e = \frac{1}{m_e^2}$ ,  $p_\Theta = \frac{1}{m_\Theta^2}$  – ваги результатів визначень з окремих прийомів. Обчислення  $e_{ocm}$  і  $\Theta_{ocm}$  подано у стовпцях (4, 5, 10, 11). В останньому рядку таблиці є остаточні значення лінійної та кутової величини ексцентриситету  $e_{ocm} = 5,7$  мм та  $\Theta_{ocm} = 116^\circ$ .

Таблиця 3

**Результати визначення ексцентриситету фазового центра  
антени AT-302 “Leica”**

№№ приймів	$e_{onm}$ , мм	$m_e$ , мм	$p_e$	$e_{onm} \cdot p_e$	$v_e$ , мм	$p_{vv}$	$\Theta^0$	$m_\Theta^0$	$p_\Theta$	$\Theta \cdot p_\Theta$	$v_\Theta^0$	$p_{vv}$
1	4,7	1,7	0,35	1,63	-0,93	0,30	114	33	0,0009	0,10	-1,65	0,00
2	5,3	1,5	0,44	2,36	-0,33	0,05	110	51	0,0004	0,04	-5,65	0,01
3	5	2,1	0,23	1,13	-0,63	0,09	119	22	0,0021	0,25	3,35	0,02
4	5,9	1,5	0,44	2,62	0,27	0,03	113	30	0,0011	0,13	-2,65	0,01
5	6,6	1,5	0,44	2,93	0,97	0,42	118	72	0,0002	0,02	2,35	0,00
6	7,1	1,8	0,31	2,19	1,47	0,67	109	21	0,0023	0,25	-6,65	0,10
7	4,4	1,5	0,44	1,96	-1,23	0,67	131	32	0,0010	0,13	15,35	0,23
8	6,7	2,7	0,14	0,92	1,07	0,16	114	49	0,0004	0,05	-1,65	0,00
$\Sigma$			2,80	15,74		2,38			0,0083	0,96		0,38
$e_{ocm} = 5,7$ мм				$M_e = 0,4$ мм			$\Theta_{ocm} = 116^\circ$				$M_\Theta = 3^\circ$	

Середня квадратична похибка остаточних значень ексцентриситету обчислюється за виразами

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k P_{e_i} v_{e_i}^2}{(k-1) \cdot \sum_{i=1}^k P_{e_i}}}; \quad M_\Theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k P_{\Theta_i} v_{\Theta_i}^2}{(k-1) \cdot \sum_{i=1}^k P_{\Theta_i}}}, \quad (8)$$

де  $v_{e_i} = e_{onm_i} - e_{ocm}$ ;  $v_{\Theta_i} = \Theta_{onm_i} - \Theta_{ocm}$ .

Результати обчислення  $M_e$  і  $M_\Theta$  подані у стовпцях (6, 7, 12, 13). Середні квадратичні похибки визначення  $e_{ocm}$  і  $\Theta_{ocm}$  з восьми прийомів дорівнюють  $M_e = 0,4$  мм і  $M_\Theta = 3^\circ$ . Як видно за даними вимірів величина ексцентриситету фазового центра є досить велике значення, яке необхідно враховувати при обробці GPS-вимірів, виконаних для побудови прецизійних геодезичних мереж. Перед початком визначення ексцентриситету не була апріорно відома його лінійна складова і відповідно кут повороту антени  $\alpha$  був прийнятий довільно  $45^\circ$ . Для одержаної величини ексцентриситету  $e_{ocm} = 5,7$  мм рекомендується послідовно повертати антену на кут  $\alpha = 20^\circ$  (табл. 1). Незважаючи на це, точність визначення лінійної та кутової величини ексцентриситету свідчить про високу надійність одержаних результатів і достовірність розробленої методики вимірів.

Необхідно звернути увагу на те, що надійність остаточних результатів залежить від дотримання вимог проведення експериментальних визначень. Найбільше це стосується

другого пункту запропонованої методики. При плануванні часового вікна спостережень, крім жорсткої конфігурації супутників, необхідно виключати появу нових або втрату видимих супутників. Появу нових супутників можна виключити під час обробки вимірів. При порушенні цих вимог результати визначень елементів ексцентриситету з різних прийомів можуть мати значні розбіжності, а остаточні результати будуть спотворені.

Для прикладу наведемо діаграму визначень ексцентриситету у прийомі, для якого знехтувано прогнозуванням видимості супутників (рис. 2).

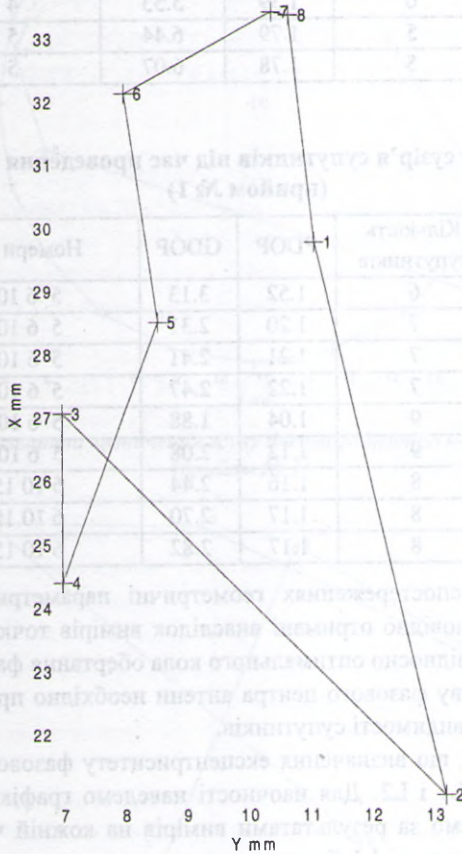


Рис. 2. Результати визначення зсуву фазового центра антени, отримане внаслідок обробки непрогнозованих спостережень

Як видно з рис. 2 рознесення точок по осі  $X$  є значно більше ніж по осі  $Y$ , що призводить до еліптичного спотворення багатокутника, який описує фазовий центр антени навколо її геометричного центра. Непослідовне положення точок 3 та 4 пояснюється тим, що під час проведення спостережень на точці 3 (з 11.10 до 11.25 за місцевим часом) відбулась різка зміна значення коефіцієнта GDOP і крім того зменшилась кількість видимих супутників (табл. 4), що також є причиною несиметричного розташування точок багатокутника.

Для порівняння наведемо дані про параметри сузір'я супутників при проведенні першого прийому вимірів представленого експерименту (табл. 5).



Таблиця 4

**Характеристики сузір'я супутників під час проведення  
непрогнозованих спостережень**

Точка	Час	Кількість супутників	PDOP	GDOP	Номери видимих супутників
2	11.00	8	1.09	1.99	4 5 6 9 14 24 25 30
3	11.10	7	1.19	2.07	4 5 6 9 24 25 30
3	11.20	6	1.39	5.53	4 5 6 24 25 30
4	11.30	5	1.79	6.44	5 6 24 25 30
5	11.40	5	1.78	6.07	5 6 24 25 30

Таблиця 5

**Характеристики сузір'я супутників під час проведення експерименту  
(прийм № 1)**

Точка	Час, год	Кількість супутників	PDOP	GDOP	Номери видимих супутників
1 поч.	10.10	6	1.52	3.13	5 6 10 24 25 30
2	10.20	7	1.20	2.31	5 6 10 17 24 25 30
3	10.30	7	1.21	2.41	5 6 10 17 24 25 30
4	10.40	7	1.22	2.47	5 6 10 17 24 25 30
5	10.50	9	1.04	1.88	5 6 10 15 17 22 24 25 30
6	11.00	9	1.12	2.08	5 6 10 15 17 22 23 25 30
7	11.10	8	1.16	2.44	6 10 15 17 22 23 25 30
8	11.20	8	1.17	2.70	6 10 15 17 22 23 25 30
1 кін.	11.30	8	1.17	2.82	6 10 15 17 22 23 25 30

При прогнозованих спостереженнях геометричні параметри сузір'я супутників є жорсткі і сталі у часі. Відповідно отримані внаслідок вимірів точки багатокутника мають симетричне розташування відносно оптимального кола обертання фазового центра.

Отже, визначення зсуву фазового центра антени необхідно проводити з врахуванням результатів прогнозування видимості супутників.

Необхідно зауважити, що визначення ексцентриситету фазового центра проводилось сумісно на двох частотах L1 і L2. Для наочності наведемо графіки визначення фазового центра (прийм № 1) окремо за результатами вимірів на кожній частоті (рис. 3 і 4). Як видно з рис. 3, на першій частоті L1 багатокутник розташування точок фазового центра є симетричний до оптимального кола його обертання. При цьому форма багатокутника практично збігається із формою багатокутника, одержаного із сумісної обробки вимірів на обох частотах (рис. 1). Що стосується результатів, одержаних за вимірами з використанням виключно другої частоти L2, то форма багатокутника суттєво спотворена, послідовність розташування точок неодноразово порушена. Це свідчить про непридатність одержаних результатів на частоті L2.

Опрацювання результатів визначення зсуву фазового центра антени на частоті L2 дають значні коливання у положенні досліджуваних точок. Ці коливання можуть бути спричинені тим, що сигнал на частоті L2 є значно слабшим, ніж на частоті L1 і тому він піддається спотворенню різноманітними факторами, які погіршують якість визначення координат.



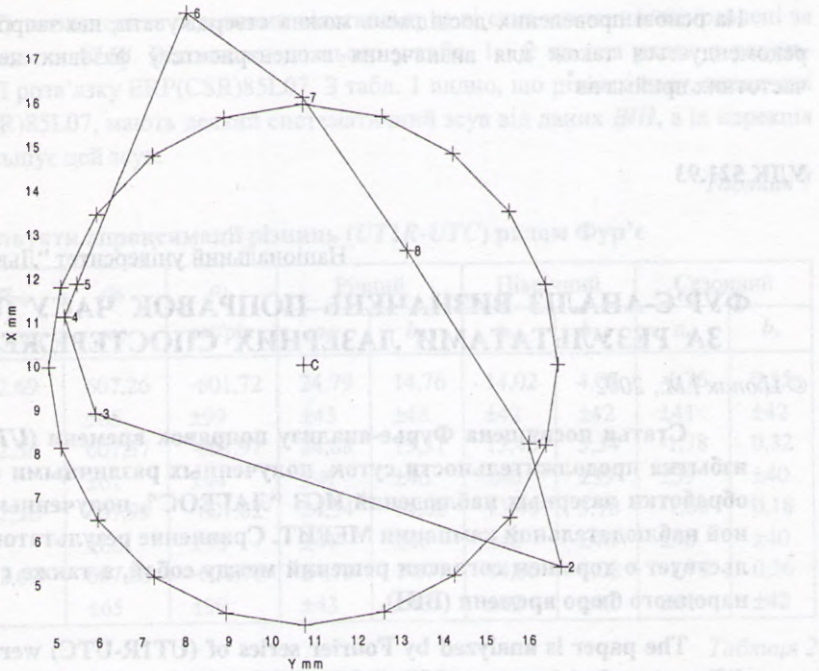


Рис. 3. Результати визначення зсуву фазового центра на частоті L1  
(прийм № 1)

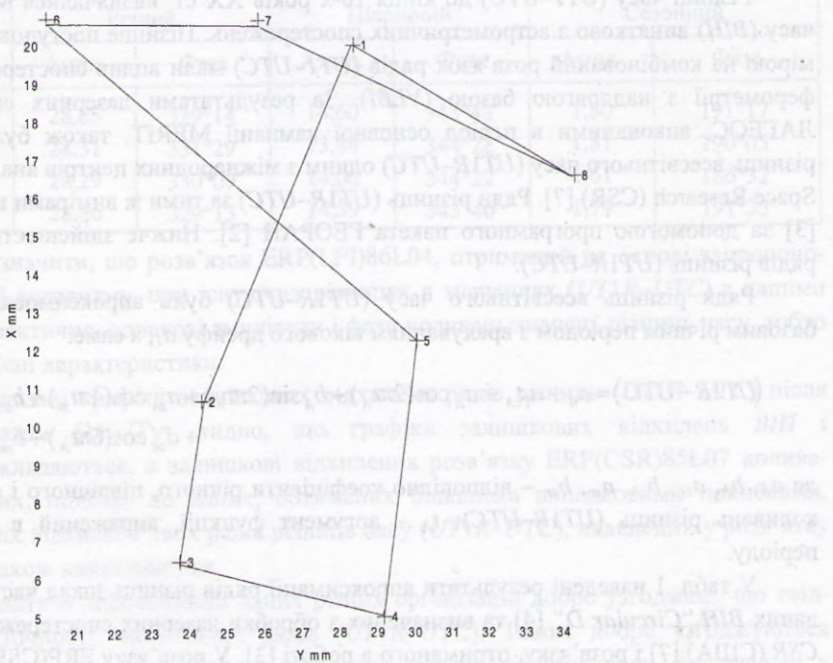


Рис. 4. Результати визначення зсуву фазового центра на частоті L2  
(прийм № 1)

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що запропонована методика рекомендується також для визначення ексцентриситету фазових центрів антен одно-частотних приймачів\*.