УДК 621.391

Б.О. Карпенко, канд. техн. наук, доц., Є.А. Якорнов, канд. техн. наук, проф.,
Г.Л. Авдєєнко, здобувач, І.Л. Ліпчевська, здобувач

# ФАЗОВІ РАДІОПЕЛЕНГАТОРИ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ГАРМОНІЙНОГО СИГНАЛУ В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ

***У статті показані недоліки фазових радіопеленгаторів (ФРП), основу яких складають триелементні розріджені антенні решітки (АР), для випадку, коли джерело радіовипромінення (ДРВ) гармонійного сигналу знаходиться в проміжній зоні (зоні Френеля) АР. Запропоновані підходи щодо визначення пеленга і дальності до ДРВ гармонійного сигналу, що розташоване в зоні Френеля АР ФРП.***

***Ключові слова: фазовий радіопеленгатор, пеленг, дальність, зона Френеля, антенна решітка, дальня зона, джерело радіовипромінення.***

***The disadvantages of the modern phase radio direction finders with three-element sparse antenna arrays (AA) for the case when radiation source (RS) of harmonic signal located in the Fresnel zone of AA is shown. Approaches for bearing angle and distance to a RS of harmonic signal, which are located in Fresnel zone of phase radio direction finder AA are proposed.***

***Keywords: phase radio direction finder, distance, Fresnel zone, distance, antenna array, distant zone, source of radio emission.***

**Постановка задачі і аналіз відомих публікацій.** У теперішній час широке поширення [1-3] одержали системи фазової пеленгації (ФП) ДРВ у дальній зоні (ДЗ), що використовують ФРП на основі АР зі слабонаправлених антен з базою ($L$), котра набагато перевищує половину довжини хвилі ($\lambda$). Це обумовлено необхідністю зниження середньоквадратичної похибки пеленгування, яка для найпростішого ФРП, що складається із двох антен, згідно [1] обернено пропорційна розмірам бази.

Разом із тим застосування таких ФРП у діапазоні надвисокх частот (НВЧ) може привести до ситуації, коли ДРВ буде потрапляти в зону Френеля АР ФРП, де фазовий (хвильовий) фронт електромагнітної хвилі (ЕМХ) ДРВ вже не можна вважати плоским. У цьому випадку, всі відомі ФРП, що використовують триелементну АР [2,3] і працюють у припущенні про наявність плоского фазового фронту ЕМХ, неминуче будуть вносити значні похибки при визначенні пеленга ($\beta$) ДРВ. У роботі [4] показана можливість визначення дальності ($d$) і пеленга ДРВ по кривизні фронту ЕМХ у ФРП із використанням розріджених АР. Однак, по-перше, в [4] не враховувався механізм усунення неоднозначності виміру фазового зсуву ($\Delta\varphi$) між сусідніми елементами АР і, по-друге, був відсутній спосіб визначення виду (плоский, сферичний) фазового фронту ЕМХ, що є вкрай необхідним для переведення системи ФП в іншій, у порівнянні з випадком розташування ДРВ у ДЗ, режим автоматичного обчислення пеленга.

**Основна мета роботи**.

1. Аналіз похибок пеленгації ДРВ при неврахуванні сферичності (кривизни) фронту ЕМХ, обумовленої знаходженням ДРВ у зоні Френеля АР ФРП для відомих схем ФП, що використовують триелементну АР;

2. Розгляд можливих способів і схемних рішень для однозначного визначення пеленга й дальності до ДРВ при наявності кривизни (сферичності) фазового фронту його ЕМХ для зазначених схем ФРП.

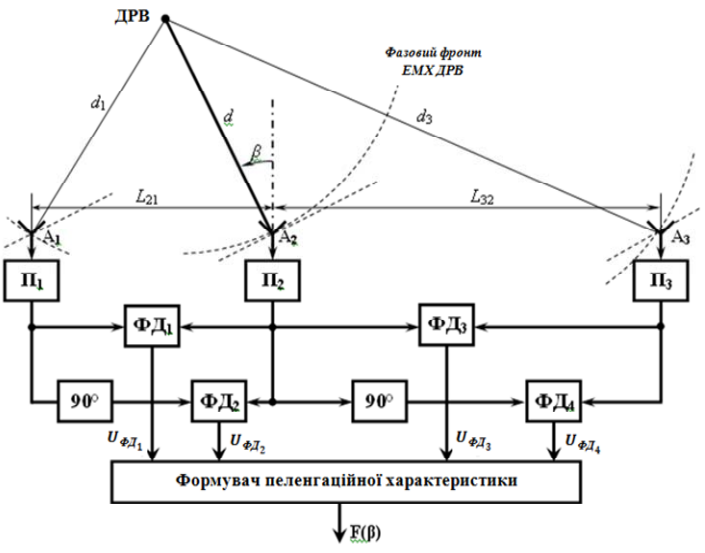



**Рис. 1**

**Основна частина**. Огляд почнемо з аналізу спрощеної згідно робіт [2,3] структурної схеми ФРП (рис.1, де $П_1$-$П_3$ – приймачі, $ФД_1$-$ФД_4$ – фазові детектори) з використанням розрідженої триелементної АР ($A_1$-$A_3$), у якому при впливі плоского фазового фронту ЕМХ ДРВ гармонійного сигналу формується пеленгаційна характеристика (ПХ) виду

$$F(\beta) = \left(U_{ФД_4} - U_{ФД_3}\right) \Big/ \left(U_{ФД_1} + U_{ФД_2}\right) = tg\left(\pi \Delta L \sin\beta/\lambda\right), \quad (1)$$

де $U_{ФД_1} = K_Д U_m \cos\left(\Delta\phi_{21}\right)$, $U_{ФД_2} = K_Д U_m \sin\left(\Delta\phi_{21}\right)$, $U_{ФД_3} = K_Д U_m \cos\left(\Delta\phi_{32}\right)$,

$$U_{ФД_4} = K_Д U_m \sin\left(\Delta\phi_{32}\right) \quad (2)$$

© Карпенко Б.О., Якорнов Є.А., Авдєєнко Г.Л., Ліпчевська І.Л., 2011

– сигнали на виході відповідних фазових детекторів (ФД); $\Delta\varphi_{21} = 2\pi L_{21}\sin\beta/\lambda$, $\Delta\varphi_{32} = 2\pi L_{32}\sin\beta/\lambda$ – фазові зсуви між 2-им і 1-им, 3-ім і 2-им елементами АР; $U_m$ – амплітуда сигналу, $K_Д$ – коефіцієнт передачі ФД, $\Delta L = L_{32} - L_{21}$ різниця довжин баз. При $\Delta L = \lambda/4$ забезпечується [2] однозначність вимірювання пеленга, а ПХ має вигляд

$$F(\beta) = tg(\pi\sin\beta/4), \quad (3)$$

причому при $\beta$ = -90°…90° ПХ змінюється в межах від -1 до +1.

Розглянемо роботу ФРП при знаходженні ДРВ в зоні Френеля на відстанях від фазового центру лінійної АР $d < (2L^2\cos^2\beta)/\lambda$, де $L = L_{21} + L_{32}$ – максимальний габарит АР, в площині якої знаходиться ДРВ [5]. Тоді повний фазовий зсув між крайніми антенами можна подати в вигляді

$$\Delta\phi_{31повн} = \frac{2\pi(d_3 - d_1)}{\lambda}, \quad (4)$$

де

$$d_1 = \sqrt{d^2 - L\ \sin\beta + 0{,}25L^2}, \quad (5)$$

$$d_3 = \sqrt{d^2 + L\ \sin\beta + 0{,}25L^2}, \quad (6)$$

$d$ і $\beta$ – дальність і пеленг ДРВ, відлічувані відносно центра бази АР, утвореної антенами $A_1$ і $A_3$.

З [5] відомо, що, коли відношення габаритних розмірів антенної системи $L$ до дальності $d$ до ДРВ невелике, тобто $L/d << 1$, в зоні Френеля можна обмежитися членами другого порядку малості при розкладанні (4) і (5) у ряд Тейлора (т.зв. наближення Френеля), тобто

$$d_1 \approx d - \frac{L}{2}\sin\beta + \frac{L^2\cos^2\beta}{8d}, \quad (7)$$

$$d_3 \approx d + \frac{L}{2}\sin\beta + \frac{L^2\cos^2\beta}{8d}. \quad (8)$$

Тоді підставляючи (7) і (8) в (4) отримаємо

$$\Delta\phi_{31повн} = \frac{2\pi L\ \sin\beta}{\lambda} \quad (9)$$

Таким чином, на підставі (9) можна стверджувати, що для ФРП, що складається з 2-х рознесених антен, сферичність фазового фронту ЕМХ на розкриві АР, що обумовлена знаходженням ДРВ в зоні Френеля, не впливає на точність обчислення пеленга, тобто значення пеленга не залежить від виду фазового фронту (плоский чи сферичний) і його обчислення виконується за тими ж самими формулами [1], що й для випадку плоского фазового фронту.

Похибка у визначенні фазового зсуву між елементами АР при неврахуванні в розкладанні (7) і (8) членів більш високого порядку малості має вигляд

$$\delta\Delta\varphi_{31} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[L\ \sin\beta - \left(\sqrt{d^2 + L\ \sin\beta + 0{,}25L^2} - \sqrt{d^2 - L\ \sin\beta + 0{,}25L^2}\right)\right] \quad (10)$$

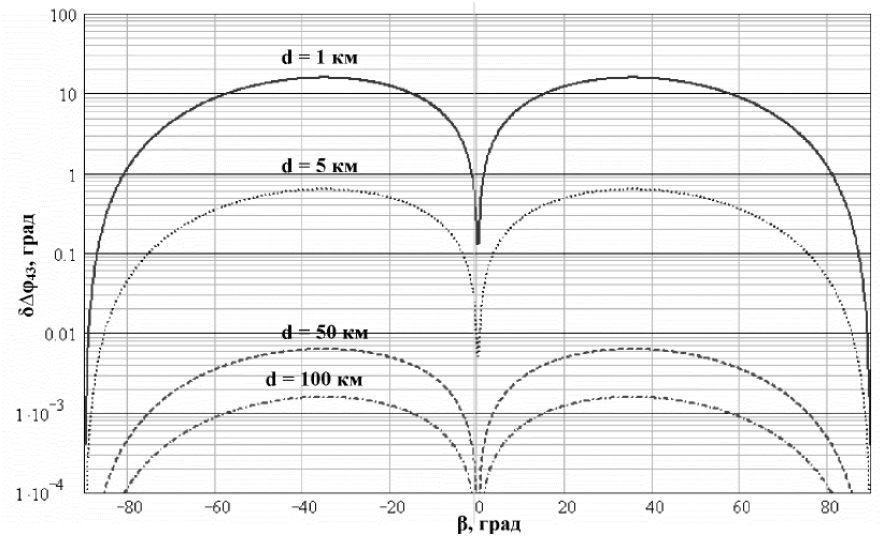



**Рис. 2**

На рис. 2 показаний графік залежності похибки у визначенні фазового зсуву гармонійного сигналу ДРВ між елементами АР згідно виразу (10) залежно від пеленга й дальності до ДРВ, причому несуча частота сигналу ДРВ прийнята рівною $f = 10$ ГГц (λ=0,03 м), а база $L$ =1000λ для дальностей до ДРВ 1 км, 5 км, 50 км і 100 км відповідно. При цьому межа ближньої зони (БЗ) згідно [5] становить $d_{Б.З}$≈ 584 м, а межа ДЗ – $d_{Д.З}$≈60 км, відповідно протяжність проміжної зони (зони Френеля) скдадатиме $\Delta d_{Пр.З} = d_{Д.З} - d_{Б.З}$ ≈59,5 км.

З рис. 2 видно, що чим ближче ДРВ до межі БЗ, тим більше похибка у визначенні фазового зсуву між антенами пеленгатора, обумовлена неврахуванням у розкладанні в ряд Тейлора членів більше високого порядку малості.

Для триелементної АР (рис.1) вирази для дальностей матимуть вигляд

$$d_1 = \sqrt{d^2 - 2d\ L_{21}\sin\beta\ + L_{21}^2} \approx d\ - L_{21}\sin\beta + \frac{L_{21}^2\cos^2\beta}{2d} \quad (11)$$

$$d_3 = \sqrt{d^2 + 2d\ L_{32}\sin\beta\ + L_{32}^2} \approx d\ + L_{32}\sin\beta\ + \frac{L_{32}^2\cos^2\beta}{2d}, \quad (12)$$

а за рахунок виникнення кривизни фронту ЕМХ у виразі (1) з'являється додатковий доданок і вираз для ПХ трансформується до виду:

$$F(\beta,d) = tg\left\{\frac{\pi}{\lambda}\left[(L_{32}-L_{21})\sin\beta + \frac{(L_{32}^2+L_{21}^2)\cos^2\beta}{2d}\right]\right\}. \quad (13)$$

Другий доданок у виразі (13) обернено пропорційний дальності до ДРВ і вноситиме до ПХ (1) похибку тим більшу, чим ближче ДРВ до пеленгатора (при $d \to \infty$ вираз (13) приводиться до (1)).

Тому для усунення цієї похибки, особливо при великих базах між антенами $A_1$-$A_3$ АР, необхідно на першому етапі ввести процедуру постійної перевірки відсутності або наявності кривизни фронту ЕМХ і далі в разі її виявлення мінімізувати похибку.

Процедуру перевірки зручніше провести, проаналізувавши різниці фаз між першою і другою ($\Delta\varphi_{21}$), другою і третьою ($\Delta\varphi_{32}$) парами антен при плоскому хвильовому фронті з урахуванням відмінності в базах $\Delta L = L_{32} - L_{21}$. Для цього візьмемо відношення

$$\frac{\Delta\varphi_{32}}{\Delta\varphi_{21}} = \frac{2\pi L_{32}\sin\beta}{\lambda}\frac{\lambda}{2\pi L_{21}\sin\beta} = \frac{L_{32}}{L_{21}} = \frac{L_{21}+\Delta L}{L_{21}} = 1 + \frac{\Delta L}{L_{21}} = 1+\delta, \quad (14)$$

де $\delta = \Delta L/L_{21}$.

Отже, згідно (14) можна записати $\Delta\varphi_{32} = \Delta\varphi_{21} + \delta\Delta\varphi_{21}$, звідки

$$\cos(\Delta\varphi_{32}) = \cos(\Delta\varphi_{21} + \delta\Delta\varphi_{21}) = \cos(\Delta\varphi_{21})\cos(\delta\Delta\varphi_{21}) - \sin(\Delta\varphi_{21})\sin(\delta\Delta\varphi_{21}). \quad (15)$$

Ця рівність справедлива для плоского фронту ЕМХ для різних баз між парами антен.

Оскільки наявні в пеленгаторі ФД (рис.1) вже формують згідно (2) напруги, що пропорційні $\sin(\Delta\varphi_{21})$, $\cos(\Delta\varphi_{21})$ і $\cos(\Delta\varphi_{32})$, то для перевірки рівності (15) необхідно сформувати співмножники $\cos(\delta\Delta\varphi_{21})$ і $\sin(\delta\Delta\varphi_{21})$.

З іншого боку процедуру перевірки можливо реалізувати як виконання рівності [6]

$$\Delta\phi_{21повн} = \Delta\phi_{32повн}\frac{L_{21}}{L_{32}} = \Delta\phi_{31повн}\frac{L_{21}}{L_{31}}, \quad (16)$$

де $\Delta\phi_{21повн} = \Delta\phi_{21вим} + 2\pi k_{21}$, $\Delta\phi_{32повн} = \Delta\phi_{32вим} + 2\pi k_{32}$, $\Delta\phi_{21вим}$, $\Delta\phi_{32вим}$ – фазові зсуви, що виміряні за допомогою фазометрів між другою та першою, третьою та другою антенами ФРП (тобто на базах $L_{21}$ та $L_{32}$); $k_{21}$, $k_{32}$ – кількість періодів фази, що втрачені при вимірюванні.

Для визначення $k_{21}, k_{32}$ можна скористатися відомим [1] прийомом, а саме, шляхом введення в розглянутий ФРП декількох пар антен з базою $\lambda/2$, тобто застосуванням грубих, але однозначних шкал виміру фазових зсувів. Тоді

$$k_{21} = \left\langle \frac{1}{2\pi}\left(\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр21} - \Delta\phi_{21вим}\right)\right\rangle, \quad (17)$$

$$k_{32} = \left\langle \frac{1}{2\pi}\left(\frac{L_{32}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр32} - \Delta\phi_{32вим}\right)\right\rangle, \quad (17.a)$$

де $\Delta\phi_{гр21}$, $\Delta\phi_{гр32}$ – фазові зсуви, виміряні за відповідними однозначними базами $L_{ГР} = \lambda/2$ (рис.3), $\langle\cdot\rangle$ – операція округлення до найближчого цілого значення.

Проаналізуємо їхнє розташування в АР з метою можливої оптимізації (зменшення) кількості функціонально необхідних елементів ФРП для визначення пеленга й дальності при наявності кривизни фронту ЕМХ. На рис.3 зображена ліва частина рис.1 АР ФРП, де штрихуванням позначено класичне положення грубої, але однозначної шкали, утвореної антенами $A_3$ і $A_4$ (база $L_{гр}$). Розглянемо як зміниться точність визначення координат ДРВ, що знаходиться в зоні Френеля ФРП, якщо грубу шкалу перемістити до центрального антенного елемента $A_2$ ФРП, тобто скористатися грубою шкалою, яка сформована антенними елементами $A_2$ і $A_5$, як показано на рис.3. Уважаючи хвильовий фронт у межах грубої, але однозначної бази, локально плоским, фазовий зсув при класичній побудові шкал пеленгатора (шкала між $A_3$ і $A_4$)

$$\Delta\phi_{гр43}(\beta,d) = \frac{2\pi L_{гр}\sin(\beta_{43}(\beta,d))}{\lambda}, \quad (18)$$

а фазовий зсув при "оптимальній" схемі формування грубої шкали (шкала $A_2$ і $A_5$)

$$\Delta\phi_{гр43}(\beta,d) = \frac{2\pi L_{гр}\sin(\beta_{43}(\beta,d))}{\lambda},. \quad (19)$$

Раніше було показано, що для зони Френеля справедливі розкладання

$$d_1 = \sqrt{d_{21}^2 - d_{21}L_{21}\sin\beta_{21} + (0{,}5L_{21})^2} \approx d_{21} - \frac{L_{21}}{2}\sin\beta_{21} + \frac{L_{21}^2\cos^2\beta_{21}}{8d_{21}}, \quad (20)$$

$$d\ = \sqrt{d_{21}^2 + d\ L_{21}\sin\beta_{21} + (0{,}5L_{21})^2} \approx d_{21} + \frac{L_{21}}{2}\sin\beta_{21} + \frac{L_{21}^2\cos^2\beta_{21}}{8d_{21}}. \quad (21)$$

Тоді істинний фазовий зсув між елементами $A_1$ та $A_2$

$$\Delta\varphi_{21}(\beta,d) = \frac{2\pi(d-d_1)}{\lambda} = \frac{2\pi L_{21}\sin(\beta_{21}(\beta,d))}{\lambda}, \quad (22)$$

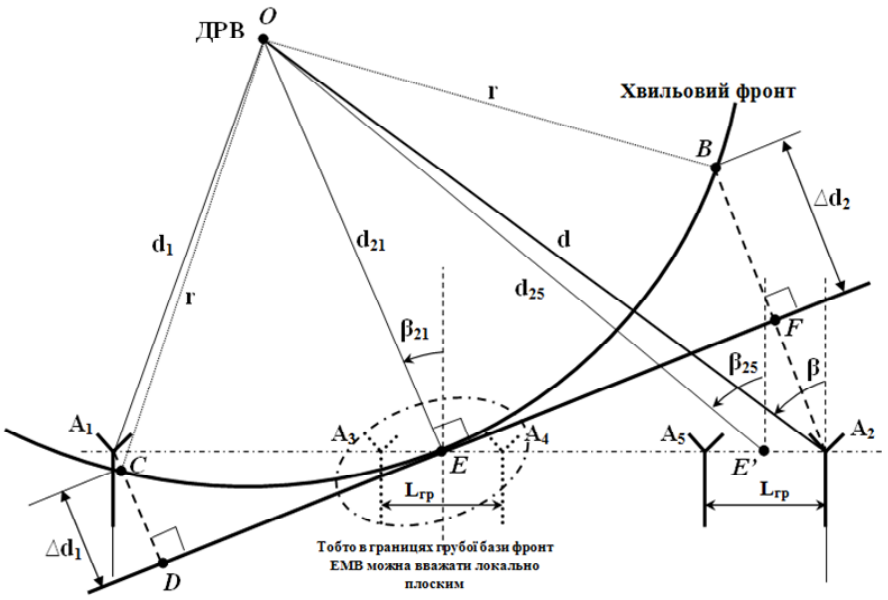



**Рис. 3**

На рис.3 показана також апроксимація сферичного хвильового фронту на базі $L_{21}$ плоским хвильовим фронтом, симетричним відносно як бази $L_{21}$, так і бази $L_{ãð}$, при цьому ОС = ОВ = r. Оскільки точка Е – центр бази $L_{21}$, а також враховуючи, що DE = EF і OE перпендикулярні до DF, мож-на стверджувати, що CD = BF = $\Delta d_1 = \Delta d_2$, тобто похибки в різницях ходу ЕМХ при апроксимації сферичного фронту плоским однакові. Звідси можна стверджувати, що фазовий зсув між сусідніми антенними елементами (у цьому випадку, це $A_1$ і $A_2$) не залежить від дальності $d_{21}$ до ДРВ, відлічуваної відносно центра бази $L_{21}$ (і відповідно грубої бази $A_3$ і $A_4$), оскільки через рівність різниць ходу ЕМХ ($\Delta d_1 = \Delta d_2$) відбувається компенсація квадратичних і більш високого порядку фазових набігів при обчисленні різниці фаз сигналів між $A_1$ і $A_2$, які й спричиняють кривизну фронту. Однак зазначений фазовий зсув лінійно залежить від пеленга $\beta_{21}$, що повинен відлічуватися від центра бази. Таким чином, у цьому випадку вплив сферичного хвильового фронту повністю еквівалентний дії плоского, що надходить не з напрямку $\beta$, а з напрямку $\beta_{21}$, який у свою чергу залежить від реальних пеленга $\beta$ і дальності $d$ до ДРВ.

Аналогічна апроксимація сферичного хвильового фронту плоским хвильовим фронтом несиметрично відносно бази $L_{21}$, але симетрично відносно бази антен $A_2$ і $A_5$ показує, що $\Delta d_1 \neq \Delta d_2$, тобто не відбувається повна компенсація квадратичних фазових набігів і набігів більш високого порядку. І тому така апроксимація сферичного фронту плоским некоректна, оскільки приводить до похибки при обчисленні фазового зсуву.

Очевидно, що помилка в обчисленні фазового зсуву на грубій шкалі, що утворена антенами $A_2$ і $A_5$ (несиметрична груба шкала) відносно грубої шкали, що утворена антенами $A_3$ і $A_4$ (симетрична груба шкала) може бути оцінена за формулою

$$\Delta\Delta\phi_{ãð21}(\beta,d) = \Delta\phi_{ãð43}(\beta,d) - \Delta\phi_{ãð25}(\beta,d) = \frac{2\pi L_{ãð}[\sin(\beta_{43}(\beta,d)) - \sin(\beta_{25}(\beta,d))]}{\lambda}. \quad (23)$$

Для знаходження виразу для першого синуса в (23) з трикутника $OA_2E$ (рис.3) отримаємо, що і скористаємось теоремою синусів

$$d_{21} = \sqrt{d^2 - d\ L_{21}\sin\beta + (0{,}5L_{21})^2}\ , \quad (24)$$

$$\frac{d_{21}}{\sin(90^o - \beta)} = \frac{d}{\sin(90^o + \beta_{21})}\ .\ \text{Звідси}\ \cos(\beta_{21}) = \frac{d\cos\beta}{d_{21}}\ ,$$

$$\sin(\beta_{21}(\beta,d)) = \sqrt{\frac{d_{21}^2 - d^2\cos^2\beta}{d_{21}^2}} = \sqrt{\frac{(0{,}5L_{21})^2 + d^2\sin^2\beta - L_{21}d\sin\beta}{(0{,}5L_{21})^2 + d^2 - L_{21}d\sin\beta}}\ . \quad (25)$$

Аналогічно з трикутника $OA_2E'$ отримаємо

$$\sin(\beta_{25}(\beta,d)) = \sqrt{\frac{d_{25}^2 - d^2\cos^2\beta}{d_{25}^2}} = \sqrt{\frac{(0{,}5L_{ГР})^2 + d^2\sin^2\beta - L_{ГР}d\sin\beta}{(0{,}5L_{ГР})^2 + d^2 - L_{ГР}d\sin\beta}}\ . \quad (26)$$

Відповідно до виразів (23)-(26) на рис.4 показані графіки залежності помилок $\Delta\Delta\phi_{ãð21}$ в залежності від дальності $d$ і пеленга $\beta$ ДРВ, відлічуваних від центральної антени ФРП при $L_{21}$=1000$\lambda$ і $\lambda$=0,03м.

Із графіків на рис.4 видно, що в міру того, як збільшується дальність до ДРВ і хвильовий фронт зі сферичного поступово перетворюється в плоский, похибка обчислення фазового зсуву зменшується, наближуючись до нуля.

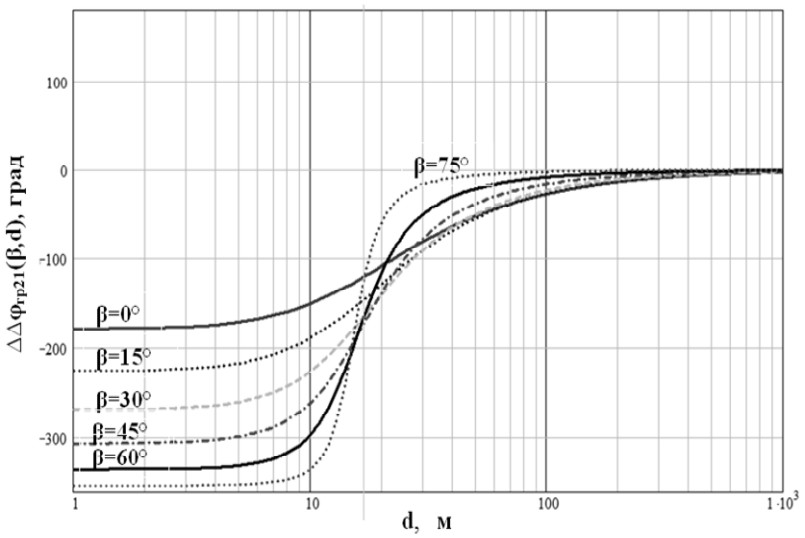



**Рис. 4**

Розглянемо потенційні похибки при вимірюванні фазових зсувів за рахунок втрачених повних періодів фази несучого коливання. Очевидно, що згідно з (16) при використанні симетричної грубої шкали $A_3$, $A_4$ (рис.3) справедливі співвідношення

$$\Delta\phi_{21сим}(\beta,d)=\Delta\phi_{21вим}(\beta,d)+2\pi k_{21сим}(\beta,d), \qquad (27)$$

$$\Delta\phi_{21сим}(\beta,d)=\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр43}(\beta,d), \qquad (28)$$

де $\Delta\phi_{21вим}(\beta,d)$ – фазовий зсув сигналу, виміряний $ФД_1$ (рис.1) між антенами $A_2$ и $A_1$ відповідно, а $k_{21сим}(\beta,d)$ – коефіцієнт, що враховує кількість втрачених повних періодів фази несучого коливання.

Вираз для цього коефіцієнта згідно з (17) та (27) матиме вигляд

$$k_{21сим}(\beta,d)=\frac{1}{2\pi}\left\langle\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр43}(\beta,d)-\Delta\phi_{21вим}(\beta,d)\right\rangle. \qquad (29)$$

де $\langle\cdot\rangle$ – операція округлення до найближчого цілого значення.

При використанні несиметричної грубої шкали $A_2$, $A_5$ (рис.3) можна аналогічно до (27) записати

$$\Delta\phi_{21несим}(\beta,d)=\Delta\phi_{21вим}(\beta,d)+2\pi k_{21несим}(\beta,d), \qquad (30)$$

$$\Delta\phi_{21несим}(\beta,d)=\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр25}(\beta,d), \qquad (31)$$

звідки кількість втрачених повних періодів фази несучого коливання

$$k_{21несим}(\beta,d)=\frac{1}{2\pi}\left\langle\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\phi_{гр25}(\beta,d)-\Delta\phi_{21вИМ}(\beta,d)\right\rangle. \qquad (32)$$

Враховуючи, що $\Delta\phi_{21несим}(\beta,d)\neq\Delta\phi_{21сим}(\beta,d)$, похибка в кількості повних періодів фази несучої, що обумовлена "переносом" грубої шкали з центру бази $L_{21}$ до її межі, дорівнюватиме

$$\Delta k_{21}(\beta,d)=k_{21сим}(\beta,d)-k_{21несим}(\beta,d)=\frac{1}{2\pi}\left\langle\frac{L_{21}}{L_{ГР}}\Delta\Delta\phi_{гр21}(\beta,d)\right\rangle. \qquad (33)$$

На рис. 5 наведені графіки залежності $\Delta k_{21}(\beta,d)$ від дальності й пеленга при $L_{21}$=1000$\lambda$ і $\lambda$=0,03м.

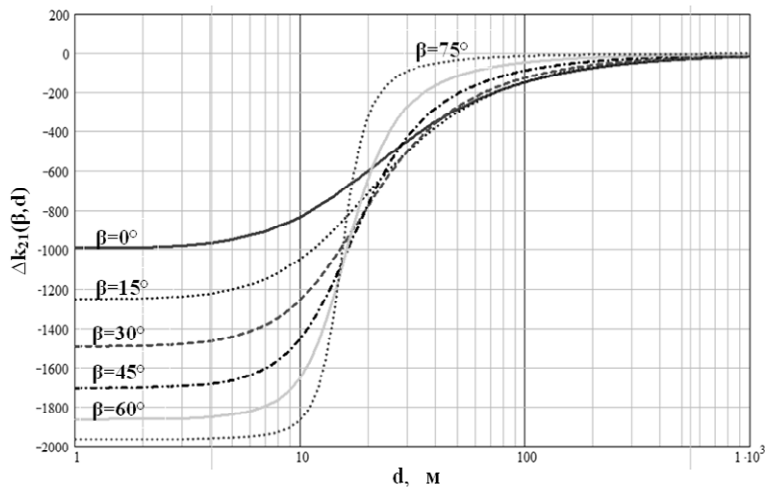



**Рис. 5**

Із графіків на рис. 5 видно, що характер графіків збігається із графіками на рис.4, тобто, у міру того, як збільшується дальність до ДРВ і хвильовий фронт зі сферичного поступово перетворюється в плоский, похибка обчислення фазового зсуву й похибка кількості загублених повних періодів зводяться на ні, наближуючись до нуля.

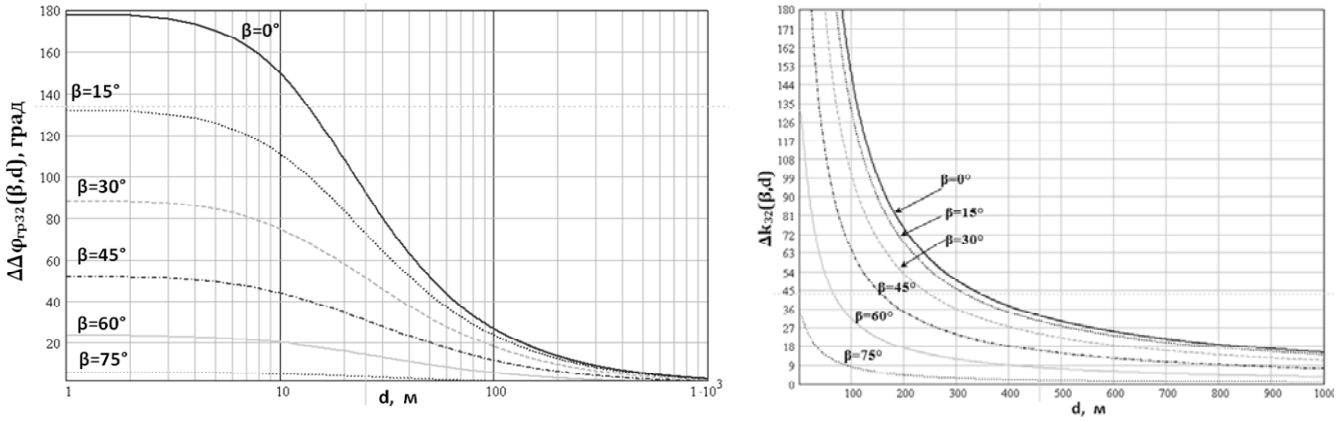
Результати аналогічного проведеному вище аналізу помилок для правої частини (рис. 1) АР ФРП при $L_{32}$ =1000,25$\lambda$ і $\lambda$ =0,03 м наведені на рис.6,а, б (параметри $\Delta\Delta\phi_{гр32}(\beta,d)$, $\Delta k_{32}(\beta,d)$ ).

Похибка вимірювання пеленга для несиметричних грубих шкал ФРП

$$\Delta\beta(\beta,d)=\left|\beta-\beta_1(\beta,d)\right| \tag{34}$$

де $\beta$ – дійсний пеленг ДРВ, $\beta_1(\beta,d)$ – пеленг ДРВ, розрахований з урахуванням похибок в повних фазових зсувах поміж відповідними елементами ФРП, тобто

$$\beta_1(\beta,d)=\arcsin\left(\frac{\lambda\left(\Delta\phi_{32несим}(\beta,d)L_{21}^2+\Delta\phi_{21несим}(\beta,d)L_{32}^2\right)}{2\pi L_{21}L_{32}(L_{21}+L_{32})}\right) \tag{35}$$




а) б)

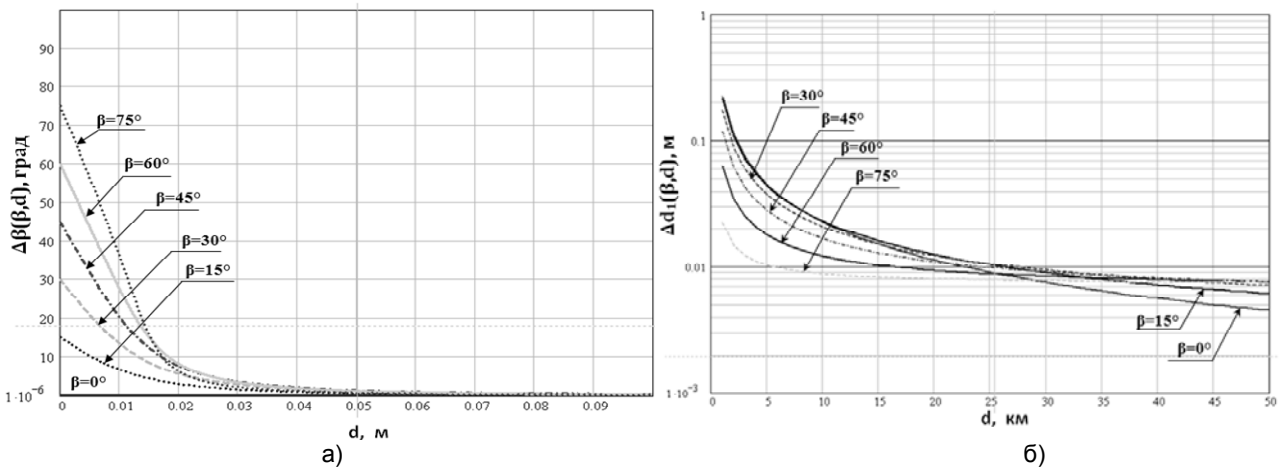
**Рис.6**

Похибка вимірювання дальності між дійсним $d$ і розрахованим $d_1(\beta,d)$ значенням дальності до ДРВ при використанні симетричних грубих шкал

$$\Delta d_1(\beta,d)=\left|d-d_1(\beta,d)\right| \tag{36}$$

де

$$d_1(\beta,d)=\frac{4\pi^2L_{21}^2L_{32}^2(L_{21}+L_{32})^2-\lambda^2\left(\Delta\phi_{32сим}(\beta,d)L_{21}^2+\Delta\phi_{21сим}(\beta,d)L_{32}^2\right)^2}{4\pi L_{32}(L_{21}+L_{32})\lambda\left(\Delta\phi_{32сим}(\beta,d)L_{21}^2-\Delta\phi_{21сим}(\beta,d)L_{21}L_{32}\right)}. \tag{37}$$




а) б)

**Рис. 7**

Аналогічно, похибка вимірювання дальності при використанні несиметричних грубих шкал

$$\Delta d_2(\beta,d)=\left|d-d_2(\beta,d)\right|, \tag{38}$$

де $d_2(\beta,d)$ обчислюється так само, як і (37), але необхідно змінити $\Delta\phi_{21сим}$ на $\Delta\phi_{21несим}$, а $\Delta\phi_{32сим}$ на $\Delta\phi_{32несим}$.

З рис. 7,а видно, що похибки обчислення фазових зсувів (які обумовлені неправильно розрахованими $k_{21}$, $k_{32}$ ) для несиметричної шкали не впливають на точність обчислення пеленга ДРВ. На наш погляд, це мож-

на пояснити різнополярним характером зміни помилок $\Delta k_{21}(\beta,d)$ і $\Delta k_{32}(\beta,d)$, що у свою чергу веде до їхньої взаємної компенсації під знаком арксинуса у формулі (35).

На рис. 7,б наведені відповідно графіки залежності похибки виміру дальності $\Delta d_1(\beta,d)$ для випадку симетричного розміщення грубої шкали, з якого видно, що помилка виміру дальності дуже мала і практично дорівнює нулю.

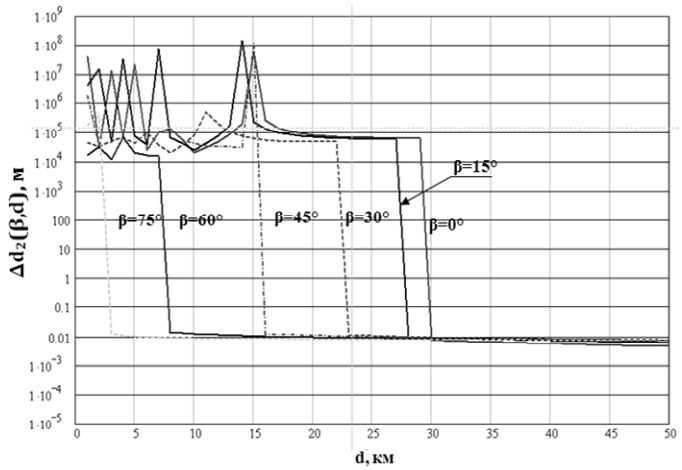



**Рис. 8**

На рис. 8 показані графіки залежності похибки виміру дальності $\Delta d_2(\beta,d)$ від дальності й пеленга ДРВ для випадку несиметричного розміщення грубої шкали, з якого видно, що похибка виміру $d$ дуже велика, але починаючи з деякого значення критичного значення $d$, що залежить від $\beta$, помилка виміру дальності різко спадає до нуля.

Таким чином, результати математичного моделювання показують, що для зони Френеля несиметричне розміщення грубих баз для мінімізації числа задіяних антен і вимірювального устаткування дозволяє практично без похибок визначати при наявності кривизни фронту ЕМХ пеленг, але для виміру дальності за кривизною хвильового фронту хвилі помилки мінімальні тільки при симетричному розташуванні баз. Тому для виміру дальності необхідно використовувати класичну [1] симетричну схему розміщення грубих, але однозначних баз усередині точних, які на практиці важко реалізувати через кінцеві габаритні розміри слабонаправлених антен, коли проблематично забезпечити їхнє розміщення на відстані $L_{гр} = 0,5\lambda$.

Отже, для випадку симетричного розміщення грубих баз здійснюється перевірка рівності (16) і, якщо воно не виконується, то визначення пеленга й дальності по кривизні фронту ЕМХ здійснюється за наступними співвідношеннями

$$\beta = \arcsin\left[\frac{\lambda\left(\Delta\phi_{21повн}L_{21}^2 + \Delta\phi_{32повн}L_{32}^2\right)}{2\pi\left(L_{21}+L_{32}\right)L_{21}L_{32}}\right]. \quad (39)$$

$$d = \frac{4\pi^2L_{21}^2L_{32}^2\left(L_{21}+L_{32}\right)^2 - \lambda^2\left(\Delta\phi_{32повн}L_{21}^2 + \Delta\phi_{21повн}L_{32}^2\right)^2}{4\pi L_{32}\left(L_{21}+L_{32}\right)\lambda\left(\Delta\phi_{32повн}L_{21}^2 - \Delta\phi_{21повн}L_{21}L_{32}\right)}. \quad (40)$$

У випадку випромінювання ДРВ гармонійного сигналу в триелементній лінійній нееквідистантній розрідженій АР формування однозначної шкали виміру фази можна здійснити шляхом застосування схем поділу частоти [7].

Оскільки у виразі (15) $\delta << 1$, то це еквівалентно поділу фази сигналу в $\delta^{-1}$ разів і завдання знаходження $\cos(\delta\Delta\varphi_{21})$ і $\sin(\delta\Delta\varphi_{21})$ можливо здійснити за допомогою трьох дільників частоти і двох додаткових ФД. При цьому перший та третій дільники частоти, з'єднані в паралель із виходами антен $A_1$ і $A_2$ (рис.1), спільно з $ФД_5$ (дільники частоти та ФД на рис.1 не показані (див. [8])) формують напругу

$$U_{ФД5} = K_д K_{дч} U\cos(\delta\Delta\phi_{21}), \quad (41)$$

а другий та третій дільники частоти, з'єднані відповідно в паралель із виходом антени $A_1$ через перший фазообертач на $90^o$ і з виходом антени $A_2$ з $ФД_6$

$$U_{ФД6} = K_д K_{дч} U \sin(\delta\Delta\phi_{21}), \quad (42)$$

де $K_{д÷}$ – коефіцієнти передачі дільників частоти.

Далі ці напруги для виділення добутку спочатку підносяться у квадрат, підсумовуються і результат підсумовування витягується з-під квадратного кореня. Вирази (41) і (42) діляться на отримане значення, що фактично приводить до їх нормування і запису у вигляді

$$\frac{U_{ФД5}}{K_д K_{дч} U} = \cos(\delta\Delta\phi_{21}) = \grave{U}_{ФД5}, \quad (43)$$

$$\frac{U_{ФД6}}{K_д K_{дч} U} = \sin(\delta\Delta\phi_{21}) = \grave{U}_{ФД6}. \quad (44)$$

Остаточна перевірка умови плоского фронту хвилі здійснюється у формувачі ПХ (рис.1) і, якщо рівність (15) виконується, то починається процедура формування ПХ $F(\beta)$ згідно з (1) і визначення по ній пеленгу.

При невиконанні рівності (15) пеленг повинен визначатися зі співвідношення (13), але оскільки дальність невідома, то в [8] запропоновано ввести регульований фазообертач, максимальне значення якого пропорційне

відхиленню від рівності, а шкала проградуйована по дальності. Фазообертач затримує фазу гармонійного сигналу для середньої антени (рис.1) на таку величину, щоб фази сигналів від усіх трьох антен на виходах приймачів стали однакові, що еквівалентно плоскому фронту ЕМХ. У процесі регулювання здійснюється контроль рівності (15) і при досягненні заданої нев'язки знову формується ПХ (1) і визначається пеленг, а по положенню фазообертача визначається дальність до ДРВ у зоні Френеля.

**Висновки.** Із проведеного аналізу похибок виміру пеленга і для зони Френеля дальності, залежно від місця розташування грубих, але точних баз, для триелементної розрідженої АР ФРП можна зробити висновок, що їхнє положення практично не впливає на точність виміру пеленга, але для більш точного визначення дальності їх необхідно розміщувати посередині точних, але неоднозначних баз. У випадку випромінювання ДРВ гармонійного сигналу формування однозначної шкали виміру фази можна здійснювати шляхом застосування схем поділу частоти.

1. Денисов В.П. Фазовые пеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. Монография. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251с. 2. Патент №2138061 (Россия). Фазовый радіопеленгатор. М кл. G01 S 3/48 // Беспалов Е.С, Кургин В.В. БИ, 1999 г., № 26. 3. Патент №2134429 (Россия). Фазовый способ пеленгации. М кл. G01 S 3/00, G01 S 3/46 // Дикарев В.И, Карелов И.Н., Замарин А.И. БИ, 1999 г., № 22. 4. Карпенко Б.О., Авдєєнко Г.Л., Федоров В.І., Якорнов Є.А. Визначення координат точкового джерела радіовипромінювання по кривизні його хвильового фронту. Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. – Вип. №21 – К.: ВІКНУ, 2009, с.74–79. 5. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов / И.Я. Кремер, А.И. Кремер, В.М. Петров и др.; Под ред. И.Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с. 6. Авдєєнко Г.Л., Карпенко Б.О., Якорнов Є.А. та інш. Розробка методів підвищення ефективності просторово-часової обробки телекомунікаційних сигналів на фоні перешкод. Звіт з НДР, К.: НТУУ "КПІ", НДІ телекомунікацій 2010, 393 с. (номер облікової картки 0210U005589). 7. Комарович В.Ф. Методы пространственной обработки радиосигналов / В.Ф. Комарович, В.В. Никитченко. – Л.: ВАС, 1989. – 278 с. 8. Деклараційний патент на корисну модель № 56430 (Україна). Фазовий радіопеленгатор. М. кл. G01S3/02, G01S3/00 // Авдеенко Г.Л., Карпенко Б.О., Сторубльов О.І., Ліпчевська І.Л., Якорнов Є.А. Пром. власність, 2011 р., №1.

**Надійшла до редколегії 24.08.11**