



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 89946

(13) C2

(51) МПК (2009)  
H01Q 3/26МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

## (54) КІЛЬЦЕВА АНТЕННА РЕШІТКА

1

(21) а200602034

(22) 24.02.2006

(24) 25.03.2010

(46) 25.03.2010, Бюл. № 6, 2010 р.

(72) КУЛАГІН В'ЯЧЕСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ,  
КОЧЕРГІН АНАТОЛІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ, ЧЕБОТОВ  
ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ(73) ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДА-  
ЛЬНІСТЮ "НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР РАДІО-  
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АКАДЕМІЇ НАУК ПРИКЛАД-  
НОЇ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ"

(56) UA 46150 C2; 15.06.2001

SU 1818691 A1; 30.05.1993

US 4060850 A; 29.11.1977

RU 2019006 C1; 30.08.1994

SU 1337950 A1; 15.09.1987

RU 2253877 C2; 10.06.2005

GB 594348 A; 10.11.1947

US 4123759 A; 31.10.1978

WO 03026069 A2; 27.03.2003

US 2002163480 A1; 07.11.2002

(57) 1. Кільцева антенна решітка, яка містить N  
еквідистантно розташованих по колу антенних  
елементів, N фазообертачів, N атенюаторів, сума-  
тор і блок керування, вихід якого з'єднаний з керу-  
ючими входами фазообертачів і атенюаторів, ви-

2

хід кожного фазообертача підключений до входу  
відповідного атенюатора, яка **відрізняється** тим,  
що додатково введені M блоків перемноження, де  
M дорівнює числу сполучень з N антенних елемен-  
тів по два, (M-N) фазообертачів і (M-N) атенюа-  
торів, до входів суматора підключені виходи ате-  
нюаторів, причому кожний блок перемноження  
з'єднаний виходом з входом відповідного фазоо-  
бертача, а першим і другим входами, через розга-  
лувач, - з виходом m-го і q-го антенних елемен-  
тів відповідно, при цьому

 $m = 1, 2, \dots, N,$  $q = p + 1,$ 

де: p - залишок від ділення (m+n-1) на N,

 $n = 1, 2, \dots, L,$ 

L - неповна частка від ділення N навпіл.

2. Решітка за п. 1, яка **відрізняється** тим, що кож-  
ний антенний елемент з'єднаний з блоками пере-  
множення через розгалужувач сигналу, який має  
один вхід для з'єднання з антенним елементом і  
2L виходів, причому розгалужувач сигналу вихо-  
дами з номерами 1, 2, ..., L з'єднаний з першими  
виходами відповідних блоків перемноження, а ви-  
ходами з номерами (L+1), (L+2), ..., 2L - з другими  
виходами відповідних блоків перемноження.

Винахід відноситься до антенної техніки і може  
бути використаний в радіолокації, радіопеленгації,  
радіонавігації й радіокеруванні.

Є відомою кільцева антенна решітка, яка міс-  
тить N неспрямованих антенних елементів, де  
 $N \geq 3$ , які розташовані по колу еквідистантно (з  
рівномірним кроком), лінії затримки по числу ан-  
тенних елементів, антенний комутатор і суматор,  
підключений до виходів ліній затримки. Антенний  
комутатор містить статор, до пластин якого підк-  
лючені антенні елементи, і ротор, до якого підклю-  
чені входи ліній затримки (Кукус І.С., Старик М.Е.  
Основы радиопеленгации. М. Советское радио,  
1964, с.140-142).

Кільцева антенна решітка такої конструкції за-  
безпечує формування діаграми спрямованості,  
обертання якої в азимутальній площині здійсню-

ється шляхом обертання ротора антенного кому-  
татора.

Недоліками відомої кільцевої антенної решітки  
є обмежений діапазон робочих частот, недостат-  
ньо високий коефіцієнт спрямованої дії, а також  
значні втрати сигналу в антенному комутаторі,  
який має механічні обертові елементи.

Є також відомою кільцева антенна решітка,  
яка містить N неспрямованих антенних елементів,  
де  $N \geq 3$ , які розташовані по колу еквідистантно,  
блок вагового підсумовування і формувач вагових  
множників. Блок вагового підсумовування включає  
N змішувачів і суматор. Формувач вагових мно-  
жників містить гетеродин, що формує модульоване  
по фазі синусоїдальне коливання, і лінію затримки  
с N відводами (ТІІЗР, т. 56, 1968, №11, с.54 - 55).

У відомій кільцевій антенній решітці забезпе-  
чено формування діаграми спрямованості, яка

(13) C2

(11) 89946

(19) UA

лінійно й неперервно обертається за азимутом в площині розташування антенних елементів решітки, без використання складного антенного комутатора з механічними обертовими елементами.

Недоліками відомого технічного рішення є обмежений діапазон робочих частот, недостатньо високий коефіцієнт спрямованої дії і відсутність можливості сканування діаграми спрямованості у вертикальній площині (за кутом місця).

Прототипом до пропонованого технічного рішення є кільцева антенна решітка, яка містить 4N антенних елементів, які розташовані по колу еквідистантно, 4N фазообертачів, 4N атенюаторів, три матричні комутатори, чотири суматори, чотири сумарно-різницевого блоку та блок керування. Кожна і-та група антенних елементів, яка включає і-й, (і+N)-й; (і+2N)-й і (і+3N)-й антенні елементи, через послідовно з'єднані фазообертач і атенюатор підключена до входів і-го матричного комутатора, виходи якого з'єднані з відповідними входами першого, другого, третього і четвертого суматорів. Виходи першого і другого суматорів з'єднані з входами першого сумарно-різницевого блоку, а виходи третього і четвертого суматорів - з входами другого сумарно-різницевого блоку. До входів третього сумарно-різницевого блоку підключені другий вихід першого і перший вихід другого сумарно-різницевого блоку, а до входів четвертого - перший вихід першого і другий вихід другого сумарно-різницевого блоку. Виходи третього і четвертого сумарно-різницевого блоку є виходами кільцевої антенної решітки. Блок керування з'єднаний з керувальними входами фазообертачів і атенюаторів і містить цифровий обчислювач фаз для визначення просторового набігання фаз по заданому напрямку фазування та запам'ятовуючий пристрій для зберігання інформації щодо різних поправок (патент Російської Федерації №2019006, опубл. 30.08.94, кл. МПК: H01Q3/26).

У прототипі забезпечено формування сумарно-різницевої діаграми спрямованості в двох взаємно перпендикулярних площинах.

Недоліками прототипу, як і вищезгаданих аналогів, є обмежений діапазон робочих частот, недостатньо високий коефіцієнт спрямованої дії і складність конструкції, зумовлена використанням антенних елементів у кількості, кратній чотирьом, та надмірною кількістю блоків обробки сигналів. Згідно з принципом роботи пристрою, оброблені за фазою і амплітудою сигнали від антенних елементів розподіляються матричними комутаторами так, що кожним з чотирьох суматорів підсумовуються сигнали, прийняті 1/4 частиною антенних елементів кільцевої решітки. Отже, можна вважати, що прототип є еквівалентом чотирьох ідентичних кільцевих антенних решіток, які мають по N антенних елементів і однаковий радіус кільця.

Задачею винаходу є створення кільцевої антенної решітки, в якій за рахунок введення нових блоків обробки сигналів та нових зв'язків між блоками пристрою, було б забезпечено підвищення коефіцієнта спрямованої дії антенної решітки в широкому діапазоні робочих частот.

Поставлена технічна задача вирішується тим, що до складу кільцевої антенної решітки, яка містить N еквідистантно розташованих по колу ан-

тенних елементів, N фазообертачів, N атенюаторів, суматор і блок керування, вихід якого з'єднаний з керувальними входами фазообертачів і атенюаторів, а вихід кожного фазообертача підключений до входу відповідного атенюатора, згідно з винаходом, введені M блоків перемноження, де M дорівнює числу сполучень з N антенних елементів по два, (M - N) фазообертачів і (M - N) атенюаторів, причому виходи атенюаторів підключені до входів суматора. Кожний блок перемноження з'єднаний виходом з входом відповідного фазообертача, а першим і другим входами - з виходом m-го і q-го антенних елементів відповідно, при цьому:

$m = 1, 2, \dots, N;$

$q = p+1; (1)$

де: p - залишок від ділення (m + n - 1) на N;

$n = 1, 2, \dots, L;$

L – неповна частка від ділення N навпіл.

У кільцевій антенній решітці, згідно з винаходом, кожний антенний елемент доцільно з'єднати з блоками перемноження через розгалужувач сигналу, який має один вхід для з'єднання з антенним елементом і 2L виходів, причому виходи з номерами 1, 2, ..., L з'єднані з першими входами відповідних блоків перемноження, а виходи з номерами (L + 1), (L + 2), ..., 2L – з другими входами відповідних блоків перемноження.

Введення до складу кільцевої антенної решітки блоків перемноження в кількості, що дорівнює числу сполучень з N антенних елементів по два, і сполучення входів кожного блока перемноження з виходами двох різних антенних елементів дозволило, спочатку попарно перемножить сигнали, що прийняті антенними елементами, а потім провести обробку сигналів, одержаних в результаті перемноження, за фазою і амплітудою. Завдяки цьому пропонується кільцева антенна решітка має діаграму спрямованості, ідентичну діаграмі спрямованості багатокільцевої антенної решітки, що містить L концентричних кілець по N антенних елементів, у якій діаграма спрямованості кожного антенного елемента являє собою діаграму спрямованості пари неспрямованих антенних елементів. У такій багатокільцевій антенній решітці антенні елементи зовнішнього кільця утворені парами сусідніх антенних елементів вихідної однокільцевої антенної решітки, антенні елементи наступного, меншого за розміром кільця, - з пар антенних елементів однокільцевої решітки, узятих через один і т.д. Є відомим, що багатокільцеві антенні решітки мають вищий коефіцієнт спрямованої дії в більш широкому діапазоні робочих частот, ніж однокільцеві (див. Г.З. Айзенберг та ін. Коротковолновые антенны, М., "Радио и связь", 1985г., с.404). Суттєве покращання технічних характеристик пропонованої кільцевої антенної решітки досягається без ускладнення її конструкції.

Суть винаходу пояснюється кресленнями:

Фіг.1 - функціональна схема кільцевої антенної решітки, приклад виконання з п'ятьма антенними елементами;

Фіг.2 - графік залежності відносного рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості від відносної довжини хвилі  $\lambda/R$ , побудований за результатами математичного моделювання;

Фіг.3 - графік залежності коефіцієнта спрямованої дії (КСД) кільцевої антенної решітки від відносної довжини хвилі  $\lambda/R$ , побудований розрахунковим шляхом (див. Г.З. Айзенберг та ін., Коротковолновые антенны. М., "Радио и связь", 1985г., с.400 - 404).

У конкретному прикладі здійснення винаходу (див. Фіг.1) кільцева антенна решітка містить п'ять антенних елементів 1-5, п'ять розгалужувачів 6-10 сигналу, десять блоків 11-20 перемноження, десять фазообертачів 21-30, десять атенюаторів 31-40, суматор 41 і блок 42 керування. Антенні елементи 1-5 еквідистантно розташовані по колу радіусом, наприклад, 20м. Кількість блоків перемноження, фазообертачів і атенюаторів дорівнює числу сполучень з п'яти елементів по два і розраховано за відомою формулою

$$M = C_N^2 = \frac{N!}{2!(N-2)!}$$

Вихід кожного антенного елемента 1-5 з'єднаний з входом відповідного йому розгалужувача 6-10 сигналу. Кожний розгалужувач 6-10 сигналу має чотири виходи (L дорівнює неповній частці від ділення п'яти на два, тобто  $L=2$ ,  $2L=4$ ). При цьому перший і другий виходи кожного розгалужувача 6-10 сигналу, тобто виходи з номерами 1 і 2, з'єднані з першими входами відповідних блоків 11-20 перемноження, а третій і четвертий виходи, тобто виходи з номерами 3 і 4, - з другими входами відповідних блоків 11-20 перемноження.

До першого і другого входів кожного блока 11-20 перемноження через відповідний розгалужувач 6-10 сигналу підключені виходи i-го і q-го антенних елементів відповідно. Пари антенних елементів обрані так: m послідовно набуває значення 1, 2, 3, 4 і 5, а q розраховується за формулою (1).

Таким чином, у кільцевій антенній решітці, що зображена на Фіг.1, антенний елемент 1 через розгалужувач 6 сигналу з'єднаний з першими входами блоків 11 і 12 перемноження і з другими входами блоків 18 і 19 перемноження; антенний елемент 2 через розгалужувач 7 сигналу - з першими входами блоків 13 і 14 перемноження і з другими входами блоків 11 і 20 перемноження; антенний елемент 3 через розгалужувач 8 сигналу - з першими входами блоків 15 і 16 перемноження і з другими входами блоків 12 і 13 перемноження; антенний елемент 4 через розгалужувач 9 сигналу - з першими входами блоків 17 і 18 перемноження і з другими входами блоків 14 і 15 перемноження; антенний елемент 5 через розгалужувач 10 сигналу - з першими входами блоків 19 і 20 перемноження і з другими входами блоків 16 і 17 перемноження.

Вихід кожного блока 11-20 перемноження з'єднаний з входом відповідного фазообертача 21-30, вихід якого з'єднаний з входом відповідного атенюатора 31-40. Виходи атенюаторів 31-40 з'єднані з входами суматора 41, вихід якого є виходом кільцевої антенної решітки.

Вихід блока 42 керування з'єднаний з керувальними входами фазообертачів 21-30 і атенюаторів 31-40.

Блоки кільцевої антенної решітки можуть бути реалізовані відомим чином на базі стандартних елементів за відомими схемами.

Кожний розгалужувач 6-10 сигналу може бути побудований на основі пасивних елементів розгалужування, або на основі активних елементів розгалужування; останні забезпечують узгодження вихідних імпедансів антенних елементів 1-5 і вхідних імпедансів відповідним їм блоків 11-20 перемноження.

Кожний блок 11-20 перемноження являє собою ширококутний двохканальний лінійний помножувач, на виході якого формується добуток сигналу, що надходить на його перший вхід, на комплексно спряжене значення сигналу, що надходить на його другий вхід, і може бути побудований, наприклад, на чотирьох інтегральних мікросхемах AD835 фірми Analog Devices за відомою схемою (див. Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшин, М.Н. Поляк. Цифровая обработка сигналов. М. "Радио и связь". 1985г., с.173, схема 7.4, у якій вхід  $x_1$  є другим входом блока перемноження).

Фазообертачі 21-30 можуть бути виконані у вигляді відрізків кабелю або у вигляді штучних ліній, комутація яких може здійснюватись, наприклад, за допомогою ріп-діодів, керованих командами блока 42 керування.

Як атенюатори 31-40 можуть бути використані цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), номенклатура яких широко представлена виробниками електронних приладів. При цьому вхідний сигнал подається на вхід опорної напруги ЦАП.

Суматор 41 може бути побудований на основі операційного підсилювача за типовою схемою.

Блок 42 керування може бути виконаний, наприклад, у вигляді обчислювача із запам'ятовувачим пристроєм (на кресленнях не приведений), у якому зберігаються табельовані значення модуля  $I_{mn}$  і фази  $\varphi_{mn}$  складових M - вимірного вагового вектора A. Табельовані значення модуля  $I_{mn}$  і фази  $\varphi_{mn}$  попередньо розраховані для дискретних значень аргументів, якими є довжина хвилі  $\lambda$ , азимут  $\Theta$  і кут місця  $\beta$ . Значення фази  $\varphi_{mn}$  розраховані, наприклад, за формулою:

$$\varphi_{mn} = 2kR \sin \Theta \sin(\Theta - \alpha(2m + n)) \cos \beta; \quad (2)$$

де:  $k = 2\pi/\lambda$  - хвильове число;

R - радіус кільцевої антенної решітки;

$\alpha = \pi/N$  - половина центрального кута між двома сусідніми антенними елементами;

$m = 1, 2, \dots, N$ ;

$n = 1, 2, \dots, L$ ;

L - неповна частка від ділення N навпіл. Значення модуля  $I_{mn}$  визначені, наприклад, за умови виконання одного з відомих критеріїв отримання оптимальної діаграми спрямованості (див. ТИИЭР, т. 56, 1968, №11, с.54 - 55).

Працює кільцева антенна решітка так.

Вхідні сигнали у вигляді хвиль від джерела радіосигналів, приймаються антенними елементами 1-5, на виходах яких формуються відповідно складові  $S_1-S_5$  N - вимірного сигнального вектора S (для кільцевої антенної решітки з п'ятьма антенними елементами - п'ятивимірного сигнального вектора S), які через розгалужувачі 6-10 сигналу

подаються на перший і другий входи блоків 11-20 перемноження. На виході кожного з блоків 11-20 перемноження формується складова  $M$  – вимірною вектора  $S$ , тобто десяти-вимірною вектора  $S$ , яка є добутком пари сигналів від  $m$ -го і  $q$ -го антенних елементів 1-5:

$$S_{mn}(\Theta_0, \beta_0) = S_m(\Theta_0, \beta_0) S_q^*(\Theta_0, \beta_0), \quad (3)$$

де:  $S_{mn}(\Theta_0, \beta_0)$  - вихідний сигнал  $mn$ -го блока перемноження;

$S_m(\Theta_0, \beta_0)$  і  $S_q(\Theta_0, \beta_0)$  -  $m$ -та і  $q$ -та складові  $n$ -вимірною сигнального вектора  $S$ , які надходять, відповідно, на перший і другий входи  $mn$ -го блока перемноження;

$\Theta_0$  і  $\beta_0$  – відповідно азимут і кут місця хвилі, що надходить на антенні елементи 1–5;

\* - знак комплексного спряження.

Для кільцевої антенної решітки з п'ятьма антенними елементами, здійснюється обчислення десяти добутків складових десяти-вимірною вектора  $S$ :

$$S_{11}(\Theta_0, \beta_0) = S_1(\Theta_0, \beta_0) S_2^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{12}(\Theta_0, \beta_0) = S_1(\Theta_0, \beta_0) S_3^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{21}(\Theta_0, \beta_0) = S_2(\Theta_0, \beta_0) S_3^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{22}(\Theta_0, \beta_0) = S_2(\Theta_0, \beta_0) S_4^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{31}(\Theta_0, \beta_0) = S_3(\Theta_0, \beta_0) S_4^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{32}(\Theta_0, \beta_0) = S_3(\Theta_0, \beta_0) S_5^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{41}(\Theta_0, \beta_0) = S_4(\Theta_0, \beta_0) S_5^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{42}(\Theta_0, \beta_0) = S_4(\Theta_0, \beta_0) S_1^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{51}(\Theta_0, \beta_0) = S_5(\Theta_0, \beta_0) S_1^*(\Theta_0, \beta_0)$$

$$S_{52}(\Theta_0, \beta_0) = S_5(\Theta_0, \beta_0) S_2^*(\Theta_0, \beta_0)$$

Подальша обробка складових десяти-вимірною вектора  $S$  ведеться відомим чином за допомогою десяти кіл послідовно з'єднаних фазообертачів 21-30 і атенюаторів 31-40. Залежно від заданої довжини хвилі  $\lambda$  і напрямку головної пелюстки діаграми спрямованості, який визначається величинами азимуту  $\Theta$  і кута місця  $\beta$ , блоком 42 керування зчитуються із запам'ятовуючого пристрою

(на кресленнях не наведений) табульовані значення фази  $\varphi_{mn}$  і модулів  $I_{mn}$  складових десяти-вимірною вагового вектора  $A$ . При цьому, табульовані значення фази  $\varphi_{mn}$  які були попередньо обчислені за формулою (2), подаються на керувальні входи фазообертачів 21-30 для здійснення необхідного зсуву фази, а табульовані значення модулів  $I_{mn}$  які подаються на керувальні входи атенюаторів 31-40, використовуються для їх атенюації.

В результаті на виході кожного з атенюаторів 31-40 формується сигнал, який є добутком відповідних складових десяти-вимірною вектора  $S$  і десяти-вимірною вагового вектора  $A$ .

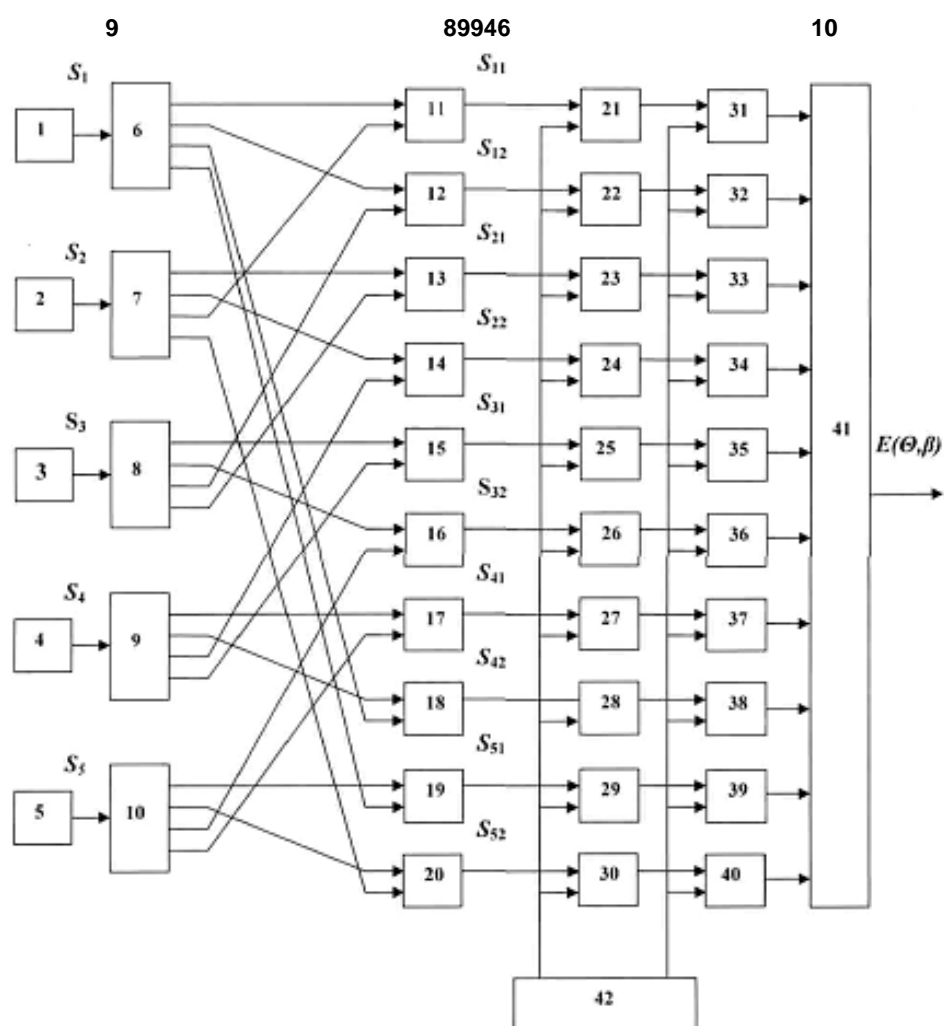
Вихідні сигнали атенюаторів 31-40 подаються на входи суматора 41, на виході якого формується вихідний сигнал кільцевої антенної решітки за формулою:

$$E(\Theta, \beta) = \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^N S_{mn}(\Theta_0, \beta_0) A_{mn}^*(\Theta, \beta) \quad (4)$$

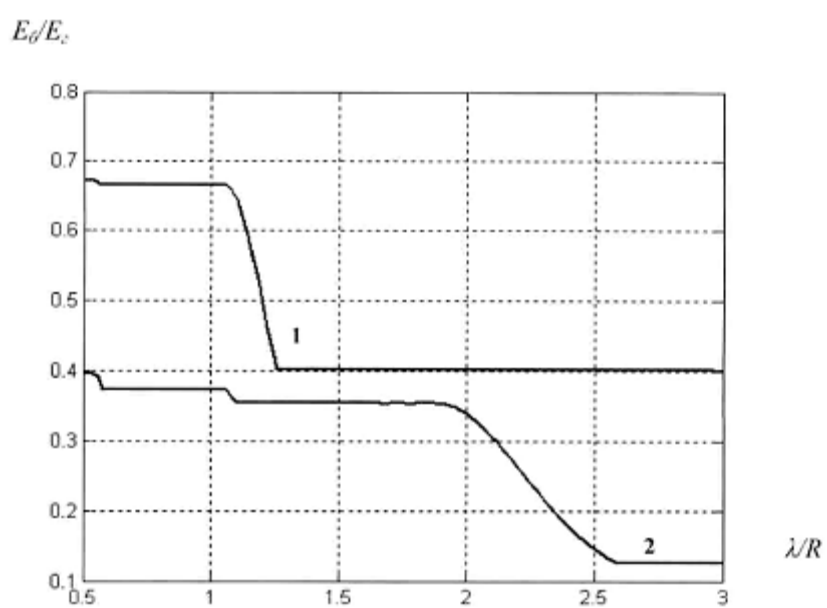
Для підтвердження отримання технічного результату були побудовані графік залежності відносного рівня бічних пелюсток  $E_b/E_r$  (де  $E_r$  і  $E_b$  - амплітуда головної і бічної пелюсток діаграми спрямованості) від відносної довжини хвилі  $\lambda/R$  (див. Фіг.2) і графік залежності коефіцієнта спрямованої дії кільцевої антенної решітки від відносної довжини хвилі  $\lambda/R$  (див. Фіг.3). На графіках (див. Фіг.2 і Фіг.3) цифрою 1 позначено криву, побудовану для прототипу, а цифрою 2 - для винаходу.

Графік на Фіг.2 свідчить, що відносний рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості пропонованого винаходу не перевищує величини 0,4 в діапазоні відносних довжин хвиль  $\lambda/R$  від 0,5 до 3, тоді як відносний рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості прототипу в діапазоні відносних довжин хвиль  $\lambda/R$  від 1,25 до 3 завжди дорівнює 0,4, а при відносних довжинах хвиль  $\lambda/R$  менших від 1,25 є неприпустимо великим і перевищує 0,67. Цим доводиться розширення робочого діапазону частот у порівнянні з прототипом.

Графік на Фіг.3 свідчить про підвищення коефіцієнта спрямованої дії в пропонованому винаході на 6-4 дБ порівняно з прототипом.

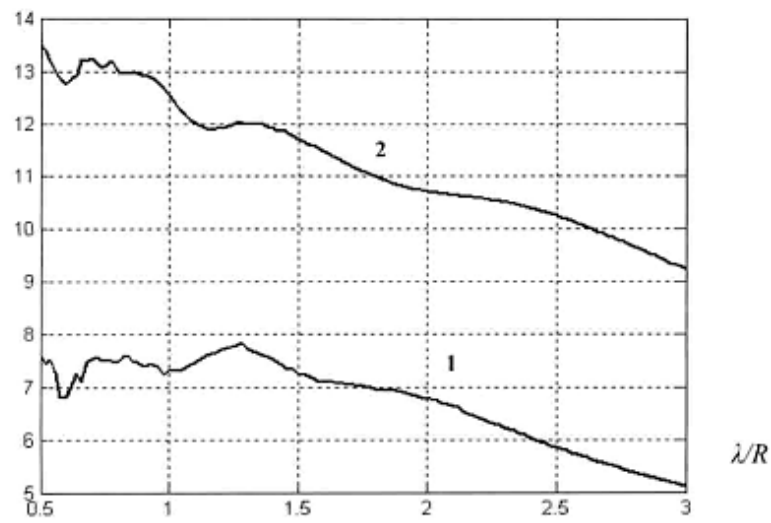


Фиг. 1



Фиг. 2

КСД, дБ



Фиг. 3