



УКРАЇНА

(19) UA (11) 52454 (13) A

(51) G 01S 13/00, G 08C 17/00, H 04B 7/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

# ОПИС ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

Видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

**(54) СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЯМОВАНОСТІ АКТИВНОЇ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ З ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ КАНАЛІВ**

1

2

(21) 2002054340

(22) 27 05 2002

(24) 16 12 2002

(46) 16 12 2002, Бюл. № 12, 2002 р

(72) Слюсар Ігор Іванович, Слюсар Вадим Іванович

(73) Слюсар Ігор Іванович

(57) 1 Спосіб формування характеристики спрямованості (ХС) активної цифрової антенної решітки з врахуванням взаємного впливу каналів, який полягає в тому, що обробку інформаційного сигналу кожного каналу здійснюють у спецобчислювачі, далі сформовані сигнали піддають операції цифро-аналогового перетворення і підсилення, каналізують в площину розкриття антенної решітки для подальшого випромінювання, який відрізняється тим, що для врахування взаємного впливу каналів перед операцією цифро-аналогового перетворення здійснюють корекцію сигналу кожного каналу за рахунок введення попередніх перекручувань

2 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що після операції цифро-аналогового перетворення сигналів перед підсиленням їх потужності здійснюють операцію перетворення частоти

3 Спосіб за пп 1, 2, який відрізняється тим, що для одновимірної антенної решітки корекцію напруг сигналів здійснюють за виразом

$$\tilde{U}_i = U_i + \sum_{g=1}^G W_g + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^K U_j W_{\Delta n}$$

де  $W_g = -\sum_{j=1}^K U_j c_{ij}^g$ , при  $g$  - непарному,

$$W_g = U_1 \sum_{j=1}^K c_{ij}^g, \text{ при } g - \text{парному,}$$

$$W_{\Delta 2} = \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq i \\ p \neq j}}^K q_{ip} q_{jp}$$

$$W_{\Delta 3} = \sum_{\substack{t,p=1 \\ t,p \neq i \\ t,p \neq j \\ t \neq p}}^K q_{it} q_{jp} q_{tp}$$

$$W_{\Delta 4} = \sum_{\substack{p,t,v=1 \\ p,t,v \neq i \\ p,t,v \neq j \\ tv \neq p \\ v \neq t}}^K q_{it} q_{jp} q_{vt} q_{vp} \text{ і т.д.}$$

G - порядок попередніх перекручувань,

$W_{\Delta n}$  - додаткові попередні перекручування, які обумовлені перехресним впливом каналів,

K - кількість каналів, вплив яких враховується,

$\tilde{U}_i$  - комплексна напруга i-го каналу після проведення корекції перед цифро-аналоговим перетворенням,

$U_i$  - комплексна напруга i-го каналу,

$U_j$  - комплексна напруга j-го каналу, що впливає,

$q_{xy}$  - комплексний коефіцієнт взаємного впливу (КВВ) x-каналу на y-канал

4 Спосіб за п 3, який відрізняється тим, що в кільцевих або дугоподібних решітках враховують декілька каналів, що облямовують канал, який коригується, зліва та справа, а також проводять апроксимацію площини розкриття решітки до площини розкриття лінійної решітки з перерахуванням КВВ та відстані між антенними елементами (АЕ)

5 Спосіб за пп 1, 2, який відрізняється тим, що для двовимірної антенної решітки формування ХС здійснюють в двох ортогональних площинах незалежно одна від одної

6 Спосіб за п 5, який відрізняється тим, що для антенних решіток довільної геометрії враховують вплив декількох каналів, що облямовують канал, який коригується, а також проводять апроксимацію площини розкриття до площини розкриття плоскої решітки з перерахуванням КВВ та відстані між АЕ

7 Спосіб за п 5, який відрізняється тим, що для антенних решіток конформного типу враховують вплив каналів, розташованих в одній площині

8 Спосіб за п 7, який відрізняється тим, що додатково враховують вплив каналів, які облямовують канал, що коригується, в іншій площині

9 Спосіб за п 8, який відрізняється тим, що для антенних решіток конусного типу враховують вплив декількох каналів, розташованих в площині однієї лінії, і каналів, що облямовують в площині кола канал, який коригується

(13) A

(11) 52454

(19) UA

10 Спосіб за пп 5-9, який **відрізняється** тим, що в плоскій еквідистантній ЦАР, що складається з ідентичних і однаково спрямованих АЕ, розташованих у  $R_x$  стовпцях і  $R_y$  рядках з відстанями між ними  $d_x$  - по горизонталі і  $d_y$  - по вертикалі, при формуванні напруги каналу з АЕ з координатами  $u_x$ , який є спільним для  $y$ -рядка та  $x$ -стовпця ( $y \in \overline{1, R_y}, x \in \overline{1, R_x}$ ), перед операцією цифро-аналогового перетворення враховується лише вплив каналів, розташованих в  $y$ -рядку і  $x$ -стовпці, при цьому комплексна напруга каналу з АЕ з координатами  $u_x$  формується за виразом

$$\tilde{U}_{yx} = U_{yx} + \sum_{g=1}^G W_{gy} + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^{K_x} U_{yj} W_{jny} + \sum_{g=1}^G W_{gx} + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^{K_y} U_{jx} W_{jnx},$$

де  $\tilde{U}_{yx}$  - комплексна напруга каналу з координатами  $u_x$  після проведення корекції перед цифро-аналоговим перетворенням,

$U_{yjx}$  - комплексні напруги каналів відповідно по рядках і стовпцях, вплив яких враховується,

$K_{xy}$  - кількість каналів відповідно по рядках і стовпцях, вплив яких враховується,

$W_{gyx}$  - обчислюється відповідно до п 3 для  $y$ -рядка і  $x$ -стовпця,

$W_{jnyx}$  - обчислюється відповідно до п 3 для  $y$ -рядка і  $x$ -стовпця

11 Спосіб за пп 5-10, який **відрізняється** тим, що використовуються проєкції КВВ каналів, які впливають, через інші канали, причому обчислення проводять із заміною напруги каналу з АЕ з координатами  $u_j$  по рядку (стовпцю) на його суму зі спроектованими через КВВ на цей канал напругами  $K_y$  каналів, розташованих у  $j$ -ому стовпці (рядку)

12 Спосіб за п 11, який **відрізняється** тим, що враховується вплив каналів, які розташовані в середині еліпса з центром симетрії, що збігається з фазовим центром каналу, який коригується, причому параметри еліпса визначаються заданою кількістю каналів, вплив яких враховується відповідно у двох площинах

13 Спосіб за пп 1-12, який **відрізняється** тим, що КВВ є функцією від напрямку випромінювання

14 Спосіб за п 13, який **відрізняється** тим, що всі напрямки випромінювання розподілені на сектори, в межах яких КВВ лишаються незмінними

Винахід стосується радіолокації, радіозв'язку і може бути використаний в передавальних системах, які створені з використанням технології цифрового діаграмоутворення на базі цифрових антенних решіток (ЦАР)

Активні ЦАР відрізняються від традиційних передавальних фазованих решіток проведенням цифро-аналогового перетворення в кожному передавальному каналі з формуванням потрібної діаграми спрямованості за допомогою спецобчислювача [1] Ця відзнака дозволяє працювати з декількома джерелами інформації одночасно та з використанням мультистандартних принципів формування сигналів

Відомі методи синтезу характеристики спрямованості (ХС) ЦАР в режимі роботи на передачу за допомогою складного набору вагових коефіцієнтів

Зокрема в [2] застосовується циліндрична неспрямована ЦАР, яка містить лінійки з вертикально розташованими прямокутними випромінювачами При цьому у зазначений спосіб формується чотири парціальних промені випромінювання Однак цей підхід взагалі не вирішує проблему взаємного впливу каналів, ігнорування якого може призвести до істотних втрат енергетики сигналів, а стосовно зв'язку - до його зриву [3]

Стосовно конформних типів ЦАР [2, 4], якщо і можливе припущення, що вплив каналів, розташованих в сусідніх вертикальних лінійках, порівняно менше впливу каналів в межах вертикальної лінійної решітки, до якої належить канал, що коригується, то при розгляді інших типів геометрії полотна ЦАР такий шлях неприйнятний

Серед відомих методів формування ХС ан-

тенної решітки найбільш близьким за своєю сутністю до способу, що заявляється, є спосіб, розглянутий в [5] Він полягає в тому, що обробку інформаційного сигналу кожного каналу здійснюють у спецобчислювачі, далі сформовані сигнали піддають операції цифро-аналогового перетворення (ЦАП) і підсилення, каналізують в площину розкриття антенної решітки для подальшого випромінювання через антенні елементи (АЕ) (див фіг 1)

Для задоволення вимог щодо параметрів ХС та обробки сигналів, як на прийом, так і на передачу, в [5] може застосовуватись процедура калібрування Вона діє за принципом градуйованого методу забезпечення ідентичності характеристик каналів з використанням інформації про кожний канал окремо Наявність банку даних про характеристики каналів дозволяє використовувати спосіб-прототип в адаптивних до загальної заводової обстановки системах без перерви обчислювальних процедур при заданому темпі обробки інформації [5] Однак використання лише каліброчної системи не вирішує проблему взаємного впливу каналів В режимі роботи на передачу за рахунок вказаного негативного фактору ймовірність розмитості ХС ЦАР залишається

Крім того, в відповідальних випадках або при наявності підвищеної щільності бортових та наземних радіосистем в спільному районі функціонування досить актуальною для прототипу є задача забезпечення їх електроматнїтної сумісності за рахунок компенсації побічних ефектів Значимість цієї проблеми зростає при розгляді малоелементних ЦАР

Технічне завдання, вирішуване заявленим ви-

находом, полягає в удосконаленні цифрового формування ХС антенної решітки шляхом врахування взаємного впливу каналів

Сутність заявленого способу полягає в тому, що з метою компенсації перекручувань в кожному каналі на розкритті решітки, перед операцією цифро-аналогового перетворення (ЦАП) здійснюють корекцію сигналу кожного каналу за рахунок введення попередніх перекручувань

В разі, коли потрібно випромінювати сигнали з частотою, більшою, ніж можливо забезпечити апаратними засобами, які виконують операцію цифро-аналогового перетворення, необхідно після опе-

$$\text{де } W_g = -\sum_{j=1}^k U_j q_{jg}^g, \text{ при } g - \text{непарному}, W_g = \sum_{j=1}^k q_{jg}^g, \text{ при } g - \text{парному}, \quad (2)$$

$$W_{\Delta 1} = \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq 1 \\ p \neq 2}}^k q_{p1} q_{p1}, \quad W_{\Delta 2} = \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq 1 \\ p \neq 2 \\ p \neq 3}}^k q_{p1} q_{p2} q_{p2}, \quad W_{\Delta 3} = \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq 1 \\ p \neq 2 \\ p \neq 3 \\ p \neq 4}}^k q_{p1} q_{p2} q_{p3} q_{p3}, \quad (3)$$

$G$  - порядок попередніх перекручувань,

$W_{\Delta n}$  - додаткові попередні перекручування, які обумовлені перехресним впливом каналів,

$K$  - кількість каналів, вплив яких враховується,

$\bar{U}_i$  - комплексна напруга  $i$ -го каналу після проведення корекції перед цифро-аналоговим перетворенням,

$U_i$  - комплексна напруга  $i$ -го каналу,

$U_j$  - комплексна напруга  $j$ -го каналу, що впливає,

$q_{xy}$  - комплексний коефіцієнт взаємного впливу (КВВ)  $x$ -каналу на  $y$ -канал

Розглянемо більш детально сутність корекції, що пропонується, на прикладі лінійної еквідистантної ЦАР В режимі на прийом, як відомо, взаємний вплив каналів можна виразити через відповідні коефіцієнти (КВВ)

Іх чисельні значення можна одержати шляхом переходу від матриць розсіювання, що відповідають конкретному типу використовуваних антенних елементів

Напруги в каналах на зажимах антенних елементів (АЕ) на розкритті антени у випадку взаємного впливу записують у вигляді

$$\begin{aligned} U_{\text{вих } 1} &= I_1 Z_1 + I_2 Z_{12} + I_3 Z_{13} + \dots + I_k Z_{1k} \\ U_{\text{вих } 2} &= I_1 Z_{21} + I_2 Z_2 + I_3 Z_{23} + \dots + I_k Z_{2k} \\ &\dots \\ U_{\text{вих } k} &= I_1 Z_{k1} + I_2 Z_{k2} + I_3 Z_{k3} + \dots + I_k Z_k \end{aligned} \quad (4)$$

Де  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = \dots = Z_k$  - власний комплексний опір АЕ,

$Z_{12} = Z_{21}, Z_{23} = Z_{32}, \dots, Z_{ik} = Z_{ki}$  - взаємні комплексні опори АЕ. Струми в каналах виражають через власні напруги

рації цифро-аналогового перетворення сигналів перед підсиленням їх потужності здійснити операцію перетворення частоти

Для одновимірної (наприклад, лінійної) антенної решітки корекцію напруг сигналів у кожному з каналів здійснюють за виразом

$$\bar{U}_i = U_i + \sum_{g=1}^G W_g + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^K U_j W_{\Delta n}, \quad (1)$$

$$I_i = U_i / Z_i, \quad (5)$$

З врахуванням (5) рівняння (4) мають вид

$$\begin{aligned} U_{\text{вих } 1} &= U_1 \frac{Z_1}{Z_1} + U_2 \frac{Z_{12}}{Z_2} + U_3 \frac{Z_{13}}{Z_3} + \dots + U_k \frac{Z_{1k}}{Z_k} \\ U_{\text{вих } 2} &= U_1 \frac{Z_{21}}{Z_1} + U_2 \frac{Z_2}{Z_2} + U_3 \frac{Z_{23}}{Z_3} + \dots + U_k \frac{Z_{2k}}{Z_k} \\ &\dots \\ U_{\text{вих } k} &= U_1 \frac{Z_{k1}}{Z_1} + U_2 \frac{Z_{k2}}{Z_2} + U_3 \frac{Z_{k3}}{Z_3} + \dots + U_k \frac{Z_k}{Z_k} \end{aligned} \quad (6)$$

ред здійсненням операції цифро-аналогового перетворення, ввести відповідно попередні перекручування  $-q_{12}U_2$  і  $-q_{12}U_1$ , тобто піддавати цифро-аналоговому перетворенню напруги

$$\tilde{U}_1 = U_1 - q_{12}U_2, \quad \tilde{U}_2 = U_2 - q_{12}U_1. \quad (9)$$

З урахуванням (9) вираз (8) має запис

$$\begin{aligned} U_{\text{вих1}} &= U_1 - q_{12}U_2 + q_{12}U_2 - q_{12}^2U_1 = U_1 - q_{12}^2U_1 \\ U_{\text{вих2}} &= U_2 - q_{12}U_1 + q_{12}U_1 - q_{12}^2U_2 = U_2 - q_{12}^2U_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{вих1}} &= U_1 - q_{12}U_2 + q_{12}^2U_1 + q_{12}U_2 - q_{12}^2U_1 + q_{12}^3U_2 = U_1 + q_{12}^3U_2 \\ U_{\text{вих2}} &= U_2 - q_{12}U_1 + q_{12}^2U_2 + q_{12}U_1 - q_{12}^2U_2 + q_{12}^3U_1 = U_2 + q_{12}^3U_1 \end{aligned} \quad (11)$$

Таким чином, для компенсації залишкових перекручувань, виходячи з необхідного рівня залишків, слід уточнювати порядок попередніх перекручувань. Ступінь КВВ в некомпенсованих залишках напруг в каналі на розкритті антени буде на порядок вище (отже, самі значення паразитних додатків менше), чим без проведеної корекції. Чим точніше необхідно провести формування ХС ЦАР на передачу, тим вищим повинний бути порядок попередніх перекручувань. По суті, він відповідає ступеню КВВ у перекручуваннях, що підлягають компенсації.

Для довільного числа каналів ЦАР механізм компенсації взаємного впливу залишається таким же. Появу при цьому побічних перекручувань, які обумовлені перехресним впливом каналів, варто компенсувати за рахунок внесення додаткових попередніх перекручувань  $W_{\Delta n}$  (3).

В кільцевих або дугоподібних рештках враховують вплив декількох каналів, що облямовують канал, який коригується, зліва та справа, а також проводять апроксимацію площини розкриття рештки до площини розкриття лінійної рештки з перерахуванням КВВ та відстані між АЕ. При цьому КВВ каналу, який впливає, варто розглядати як функцію кута відхилення нормалі АЕ щодо нормалі АЕ каналу, який коригується, і відстані між цими каналами.

Для спрощення операцій заявленого способу іноді доцільно обмежитися обчисленням значення  $W_{\Delta n}$ , порівнянням із кроком кванта цифро-аналогового перетворення, а також для плоскої активної ЦАР вдатися до наближених обчислень, в яких може не враховуватися ряд факторів, що у кожному конкретному випадку не впливають істотно на процедуру формування ХС рештки.

Серед можливих шляхів врахування взаємно-

$$\tilde{U}_{yx} = U_{yx} + \sum_{g=1}^G W_{gy} + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^{K_n} U_{yj} W_{\Delta ny} + \sum_{g=1}^G W_{gx} + \sum_{n=2}^G \sum_{j=1}^{K_n} U_{jx} W_{\Delta nx} \quad (12)$$

де  $\tilde{U}_{yx}$  - комплексна напруга каналу з АЕ з координатами  $yx$  після проведення корекції перед цифро-аналоговим перетво-

руг -  $q_{12}^2U_1$  і  $-q_{12}^2U_2$  - некомпенсовані залишкові перекручування. Для їх усунення, необхідно в цифрові коди напруг каналів  $U_1$  і  $U_2$  перед цифро-аналоговим перетворенням ввести відповідні канали додаткові попередні перекручування з квадратичними КВВ  $q_{12}^2U_1$  і  $-q_{12}^2U_2$ . Відповідні напруги каналів на розкритті розглянутої ЦАР матимуть вигляд

го впливу каналів у режимі роботи на передачу стосовно двовимірної (наприклад, плоскої) ЦАР найбільш простим є варіант, коли формування ХС здійснюють в двох ортогональних площинах, незалежно одна від одної, наприклад, по-горизонталі і вертикалі.

Для антенних решток довільної геометрії враховують вплив декількох каналів, що облямовують канал, який коригується, а також проводять апроксимацію площини розкриття до площини розкриття плоскої рештки з перерахуванням КВВ та відстані між АЕ.

Для конформних типів решток [2, 4] враховують вплив каналів розташованих в одній площині. Такий підхід може бути розвинутий на основі додаткового врахування впливу каналів, які облямовують даний канал в іншій площині.

Для антенних решток конусного типу враховують вплив декількох каналів, розташованих в площині однієї лінії і каналів, що облямовують в площині кола канал, який коригується.

Наступний варіант виконання заявленого способу зорієнтований на застосування в плоскій еквідистантній ЦАР, що складається з ідентичних і однаково спрямованих АЕ, розташованих у  $R_x$  стовпцях і  $R_y$  рядках з відстанями між ними  $d_x$  - по горизонталі, і  $d_y$  - по вертикалі. Для такого типу рештки, при формуванні напруги каналу з АЕ з координатами  $yx$ , який є спільним для у-рядка та  $x$ -стовпця ( $y \in \overline{1, R_y}, x \in \overline{1, R_x}$ ), перед операцією цифро-аналогового перетворення враховується лише вплив каналів розташованих в у-рядку і  $x$ -стовпці, при цьому комплексна напруга каналу з АЕ з координатами  $yx$  формується за виразом

ренням,

$U_{yx}$  - комплексна напруга каналу з АЕ з координатами  $yx$ ,

$U_{yx, jx}$  - комплексні напруги каналів відповідно по рядках і стовпцям, вплив яких враховується,

$K_{yx}$  - кількість каналів відповідно по рядках і стовпцям, вплив яких враховується,

$W_{yux}$  - обчислюється згідно (2), відповідно для у-рядка і х- стовпця,

$W_{dnyx}$  - обчислюється згідно (3), відповідно для у-рядка і х- стовпця

Фактично, розглянутий варіант заявленого способу зводиться до врахування взаємного впливу каналів аналогічно решітці типу хреста Мілса, що, як відомо, складається з одного рядка й одного стовпця, розташованих тим чи іншим способом в двох ортогональних площинах. В загальному випадку КВВ для вертикальних і горизонтальних лінійок випромінювачів можуть відрізнятися через різну взаємну орієнтацію АЕ, їх асиметричність у площині розкриття ЦАР та нерівність  $d_x \neq d_y$

Можливий варіант пропонованого способу, в якому використовуються проєкції КВВ каналів, які впливають, через інші канали. Обчислення проводять відповідно до виразу (12), із заміною напруги каналу з АЕ з координатами у<sub>j</sub> по рядку (стовпцю) на його суму зі спроектованими через КВВ на цей канал напругами  $K_y$  каналів, розташованих у j-ому стовпці (можна також використовувати цю операцію стосовно не до стовпця, а до рядка)

Суть іншого варіанту способу полягає в тому, що для формування напруги каналу з АЕ з координатами у<sub>x</sub> перед операцією цифро-аналогового перетворення враховується вплив сусідніх каналів, що розташовані в середині еліпсу, центр симетрії якого збігається з фазовим центром каналу, який коригується. Параметри еліпсу ( $R_{dx}$ ,  $R_{dy}$ ) визначаються заданою кількістю каналів, вплив яких враховується відповідно у двох площинах. Очевидно, що при  $d_x=d_y=d$  і відсутності асиметричності АЕ в

площині розкриття ЦАР, еліпс перетворюється в коло. Взаємний вплив каналів враховується відповідно до виразу (1). При цьому, в нього підставляють напруги і КВВ каналів з масиву, утвореного перебором усіх каналів, що потрапили в середину еліпсу

В процедурах формування ХС можна використовувати КВВ, які є функцією від напрямку випромінювання і (або) взаємоспрямованості АЕ. Варіантів відповідної апроксимації КВВ може бути кілька. У найпростішому випадку всі напрямки випромінювання розподілені на сектори, в межах яких КВВ лишаються незмінними

Практична реалізація заявленого способу в передавальній ЦАР спирається на схемне рішення, наведене на фіг. 2, і зводиться до застосування пристрою, в якому використовувався спосіб-прототип. При цьому запропоновану операцію корекції взаємного впливу каналів здійснюють в спеціалізованих над цифровими напругами сигналів, що підлягають випромінюванню

Джерела інформації

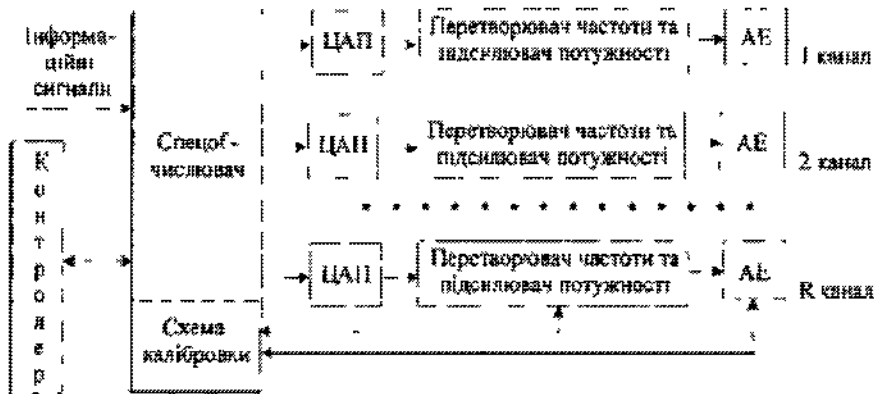
1 Слюсар ВІ, Заблоцький МА. Цифровые антенные решетки в зарубежных системах связи // Зв'язок -1999 -№ 1 -С 25-27

2 <http://www.itc.ukans.edu/RDRN/Overview.html>

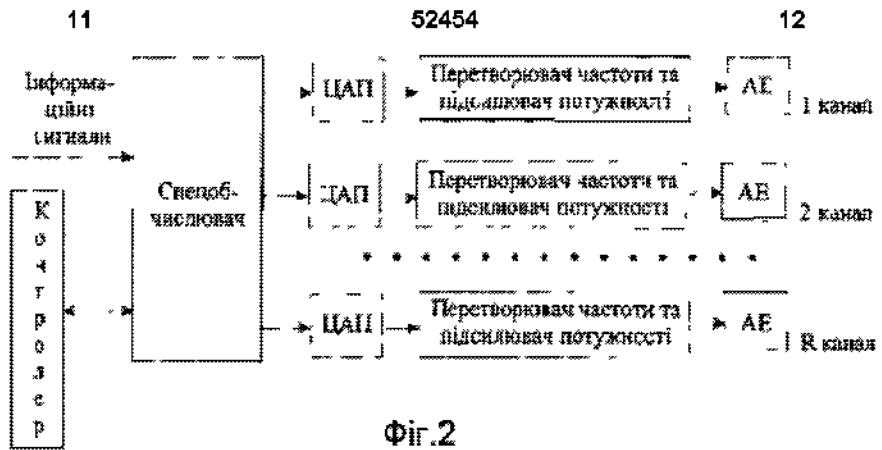
3 Слюсар ІІ. Врахування взаємного впливу каналів в системах зв'язку з адаптивними антенними решітками // Житомир Вісник ЖІТІ -2001 -№ 18 -С 72-75

4 [http://www.tcc.thomson-csf.com/outr\\_act/tech/antenna/ADAMO\\_Proect\\_Overview](http://www.tcc.thomson-csf.com/outr_act/tech/antenna/ADAMO_Proect_Overview)

5 Tsunami II - final report 98-0798, Leatherhead, August 1998, ISBN 0-7008-0682-2, 71pp - <http://www.era.co.uk/techserv/pubs/p980798.html> - прототип



Фіг.1



ДП «Український інститут промислової власності» (Укрпатент)  
 вул. Сим'ї Хохлових, 15, м. Київ, 04119, Україна  
 (044) 456 – 20 – 90

ТОВ «Міжнародний науковий комітет»  
 вул. Артема, 77, м. Київ, 04050, Україна  
 (044) 216 – 32 – 71