

УДК. 621.391

канд. техн. наук Ільїнов М. Д. ORCID: 0009-0008-6945-3354 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
канд. техн. наук Нестеренко І. К. (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
канд. техн. наук Янковський О. Г. ORCID: 0000-0001-8041-1843 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## СПОСІБ ПОБУДОВИ КОМПЕНСАТОРА ЗАВАД НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОВХОДОВИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ

Завдання підвищення завадостійкості приймальних пристроїв радіоелектронних засобів є класичним та досить актуальним в сучасних умовах. Особливо ця проблема актуальна для систем мобільного радіозв'язку, в яких для організації зв'язку в якості приймально-передаючих антен зазвичай використовуються антени з ненаправленим випромінюванням в азимутальній площині, які особливо вразливі до дії спрямованих радіозавад. Одним із основних шляхів підвищення завадозахищеності радіоелектронних засобів рухомого об'єкта є розробка всеспрямованих антен, які мають один або більше напрямків нульового прийому та можуть електрично управлятися для мінімізації завад. Найбільш підходящою конструкцією антенної системи для вирішення вказаної задачі є варіант кільцевих антенних решіток. Кільцева антенна решітка у сукупності з діаграмоутворюючою схемою відноситься до класу багатовходових антен, які дозволяють на практиці реалізувати схемно-просторовий метод об'єднання приймально-передаючих радіостанцій для збільшення каналної ємності системи мобільного радіозв'язку або для зменшення кількості антен на рухомих пунктах управління з метою підвищення їхньої мобільності скритності. У роботі запропонований спосіб побудови та варіант технічної реалізації компенсатора завад на основі багатовходових антенних систем на базі кільцевих антенних решіток з діаграмоутворюючими схемами. Визначені напрямки дослідження доцільності практичного застосування запропонованого способу підвищення завадозахищеності. Реалізація запропонованої схеми побудови антенної системи у вигляді кільцевої антенної решітки малого діаметра з просторовою адаптацією відносно напрямку приходу завад дозволить суттєво підвищити завадозахищеність абонентського комплексу системи зв'язку з рухомими об'єктами та надійність системи зв'язку у цілому.

**Ключові слова:** радіолінія, компенсатор завад, кільцева антенна решітка, діаграмоутворююча схема, навмисна завада, діаграма направленості.

**M. Ilinov, I. Nesterenko, O. Iankovskii** *The way of construction compensator interference based on usage multi-input antenna systems.*

*The task of improving the immunity of receiving devices of radio-electronic means is classic and quite relevant in modern conditions. This problem is especially relevant for mobile radio communication systems, in which antennas with non-directional radiation in the azimuthal plane, which are particularly vulnerable to directional radio interference, are mainly used to organize communication as receiving and transmitting antennas. One of the main ways to increase the immunity of radio-electronic means of a moving object is the development of omnidirectional antennas, which have one or more directions of null reception and which can be electrically controlled to minimize interference. The most suitable design of the antenna system for solving the specified problem is the option of ring antenna arrays. The ring antenna array in combination with the diagram-forming circuit belongs to the class of multi-input antennas, which allow in practice to implement the circuit-space method of combining receiving and transmitting radio stations to increase the channel capacity of the mobile radio communication system, or to reduce the number of antennas at mobile points management in order to increase their stealth mobility. The work proposes a method of construction and a variant of the technical implementation of the interference compensator based on multi-input antenna systems based on ring antenna arrays with diagram-forming circuits. The areas of study of the feasibility of practical application of the proposed method of improving immunity have been determined. Implementation of the proposed antenna system construction scheme in the form of a small-diameter ring antenna array with spatial adaptation relative to the direction of interference will allow to significantly increase the immunity of the subscriber set of the communication system with moving objects and the reliability of the communication system as a whole.*

**Keywords:** radio line, interference compensator, ring antenna array, diagram-forming circuit, intentional interference, radiation pattern.

**Постановка завдання.** Задача підвищення завадостійкості приймальних пристроїв радіоелектронних засобів (далі – РЕЗ) є класичною та не втрачає своєї актуальності протягом довгого періоду часу. Вирішення цієї задачі досягається завдяки вдосконаленню засобів і способів формування та обробки сигналів.

Особливо ця проблема актуальна для систем мобільного радіозв'язку, в яких для організації зв'язку в якості приймально-передаючих антен зазвичай використовуються антени з ненаправленим випромінюванням в азимутальній площині.

Такі антенні системи особливо вразливі до дії спрямованих радіозавад. Тому завдання підвищення завадозахищеності РЕЗ рухомих об'єктів, у складі яких використовуються всеспрямовані антени, є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень.** Одним із основних шляхів підвищення завадозахищеності РЕЗ рухомого об'єкта є розробка всеспрямованих антен, які мають один або більше напрямків нульового прийому (або мінімумів) та можуть електрично управлятися для мінімізації завад [1].

Найбільш підходящою конструкцією антенної системи для вирішення вказаної задачі є варіант кільцевих антенних решіток (КАР). В загальному вигляді така антенна система являє собою антенну решітку з випромінюючими елементами, які розташовані по колу (наприклад, навколо відбиваючої поверхні (труби), яка виконує одночасно роль траверси для закріплення випромінювачів), та діаграмо-утворюючою схемою (ДУС). КАР у сукупності з ДУС відносяться до класу багатовходових антен, які дозволяють на практиці реалізувати схемно-просторовий метод об'єднання приймально-передаючих радіостанцій для збільшення каналної ємності системи мобільного радіозв'язку або для зменшення кількості антен на рухомих пунктах управління з метою підвищення їхньої мобільності скритності [2].

Окрім можливості використовувати КАР з метою підвищення завадозахищеності РЕЗ, збільшення каналної ємності системи та зменшення кількості антен, подібні антенні системи дозволяють вирішувати й інші практичні задачі, а саме [3]:

- формувати задані діаграми направленості в азимутальній площині;
- підключати декілька передавачів (приймачів) безпосередньо без використання комбайнерів та приймальних розподіляючих панелей;
- формувати поле випромінювання у пріоритетному напрямку;
- бути складовою частиною радіопеленгаторів.

Недоліком вищерозглянутих робіт є те, що в них не вирішено завдання реалізації схеми побудови антенної системи у вигляді кільцевої антенної решітки малого діаметра з просторовою адаптацією відносно напрямку приходу завад для підвищення завадозахищеності абонентського комплексу системи зв'язку з рухомими об'єктами та надійності системи зв'язку у цілому.

**Метою статті** є вирішення наукового завдання щодо обґрунтування шляхів підвищення завадостійкості приймальних пристроїв радіоелектронних засобів зв'язку з рухомими об'єктами.

#### **Виклад основного матеріалу.**

При використанні КАР на рухомому об'єкті, де найважливішою вимогою до антенного пристрою є його масогабаритні показники, необхідно мінімізувати розміри антени, кількість випромінюючих елементів та забезпечити жорсткість конструкції у цілому. Тому на рухомих об'єктах доцільно використовувати КАР з мінімальною кількістю випромінювачів – три, чотири елементи з малим радіусом у поперечному перерізі. Така компоновка дозволяє розмістити випромінюючі елементи КАР у радіопрозорому обтічнику.

Для реалізації необхідного амплітудно-фазового розподілу струмів у випромінювачах КАР застосовуються ДУС, які виконуються у різних варіантах.

Для синфазного (мода нульового порядку) та квадратурного (мода першого порядку) збудження випромінюючих елементів ДУС може бути реалізована на квадратурних тридецибельних відгалужувачах (квадратурні мости).

На рисунку 1 представлено варіант КАР з діаграмо-утворюючою схемою, яка побудована з використанням квадратурних мостів М1, М2, М3, М4:

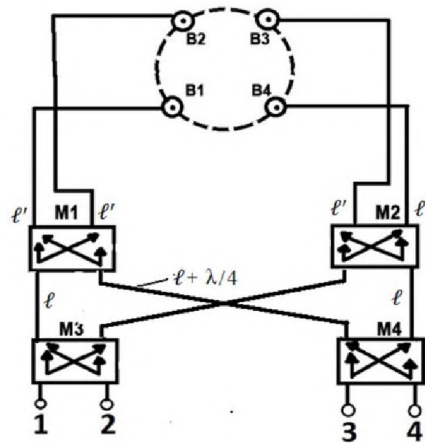


Рис. 1. ДУС на квадратурних мостах

Випромінюючі елементи антенної решітки В1, В2, В3 і В4 мають вигляд рівномірно розташованих в просторі по колу вертикальних симетричних вібраторів, які підключені до мостів М1, М2, М3 і М4. Відмінною особливістю даної ДУС є те, що виходи мостів з'єднуються між собою відрізками коаксіальних фідерів або іншими фідерними лініями (лініями передач) з довжиною  $l$  та  $l + \lambda/4$ , а з випромінювачами – відрізками  $l'$ . При такому компонуванні ДУС реалізується фазове збудження випромінювачів згідно з таблицею 1.

Таблиця 1

Варіанти компонування ДУС

№ входу	Фази струмів, град.			
	В1	В2	В3	В4
1	0	90	180	270
2	90	180	90	180
3	180	90	180	90
4	270	180	90	0

Такий амплітудно-фазовий розподіл струмів у випромінюючих елементах КАР дозволяє формувати у азимутальній площині чотири незалежні діаграми направленості (ДН) з ненаправленим випромінюванням поля у просторі. Вигляд ДН для випадку радіусу КАР  $R = 0.25\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі робочого діапазону, показаний на рисунку 2.

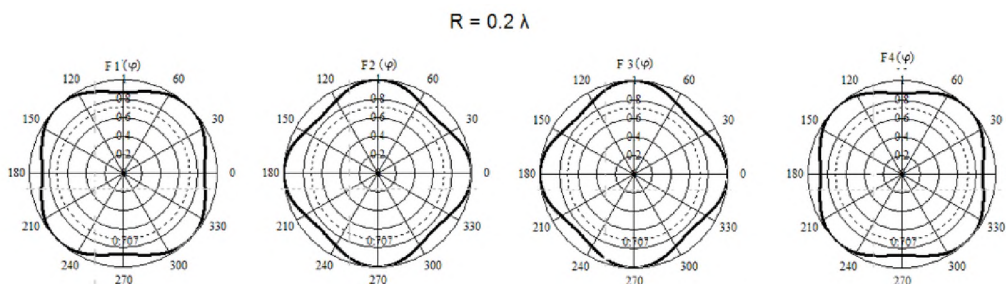


Рис. 2. ДН чотиривходової антенної решітки

Формування поля випромінювання в азимутальній площині визначається не тільки амплітудно-фазовим розподілом струмів у випромінюючих елементах КАР, але й її геометричними розмірами в поперечній площині, що наочно показано на рисунку 3.

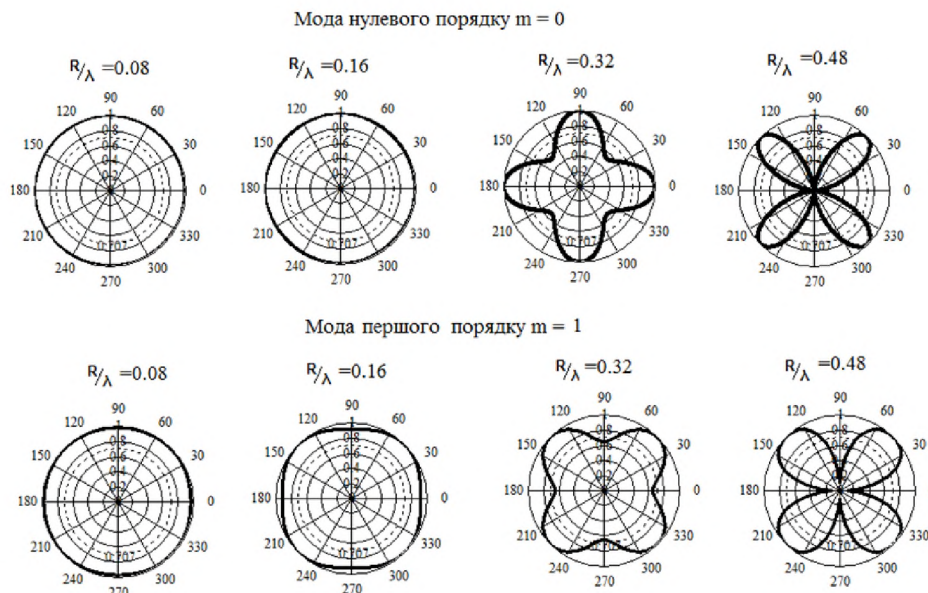


Рис. 3. ДН чотирьохелементних КАР у азимутальній площині

Аналіз теоретичних досліджень дозволяє сформулювати наступні висновки:

- при синфазному збудженні елементів решітки (мода «0»), а також при збудженні у послідовності фаз 90-180-90-180 при радіусі решітки  $0.25\lambda$ , присутня незначна нерівномірність ДН у азимутальній площині (приблизно 0,6 дБ). При зменшенні радіуса решітки ДН стає практично рівномірною. Цей випадок справедливий як за відсутності центральної відбиваючої поверхні (труби), так й за її наявності;

- при квадратурному збудженні елементів решітки (мода «1») нерівномірність ДН зростає і дорівнює приблизно 2 дБ при радіусі решітки  $0.25\lambda$ . Максимум випромінювання орієнтований під кутом  $45^\circ$ , а мінімум –  $0^\circ$ . При зменшенні радіуса до  $0.12\lambda$  нерівномірність становиться менше ніж 1 дБ, й у подальшому при зменшенні радіуса решітки зменшується. Цей ефект також не залежить від наявності труби у центрі решітки. У роботі [4] ці розрахунки підтверджено експериментально.

При синфазному збудженні випромінювачів решітки малого радіуса (мода нульового порядку) пропонується розглядати КАР як вібраторний випромінювач зі збільшеним поперековим перерізом [4].

При квадратурному збудженні випромінювачів КАР (мода 1) залежність параметрів антени від її радіусу істотна. Зовнішні характеристики КАР (з повним циклом зміни фази) не змінюються при зменшенні радіусу, а опір випромінювання, відповідно й вхідний опір кожного випромінювача, суттєво змінюється. У КАР малого діаметру, коли  $R \leq 0.12\lambda$ , збільшується взаємний вплив між випромінювачами. Однак розв'язка між входами ДУС зберігається, що підтверджується результатами експериментальних досліджень [5].

Таким чином, ДН в азимутальній площині КАР на різних входах ДУС (різних фазових модах) будуть мати майже однакову амплітуду напруженості електричного поля випромінювання, але різну фазу залежно від азимутальної координати.

Комбінація цих двох мод із рівними амплітудами дає діаграму кардіоїдної форми, в якій напрямок нуля може змінюватись шляхом зміни фазового зсуву діаграми будь-якої моди. Зміна фаз при комбінації двох мод дозволить змінювати кут формування нуля ДН антени.

Використовуючи розглянутий математичний апарат, у роботі пропонується технічне рішення, яке дозволяє суттєво підвищити заводо захищеність абонентського комплексу системи зв'язку з рухомими об'єктами та надійність системи зв'язку у цілому.

На рисунку 4 показана функціональна схема простої чотирьохелементної КАР, яка дозволяє формувати нуль у ДН з можливістю управління його положенням у азимутальній площині.

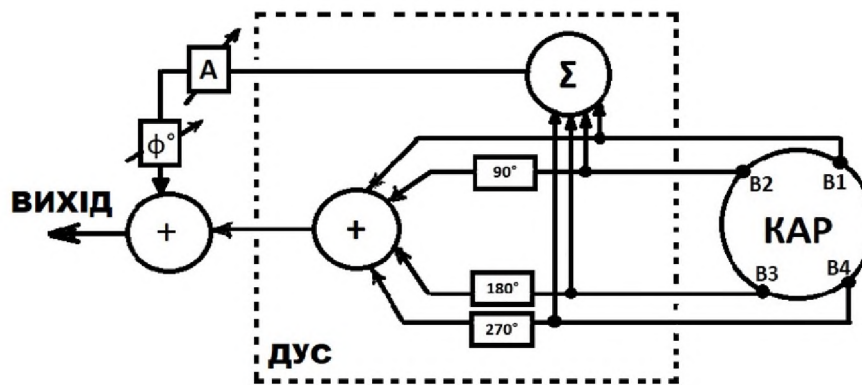


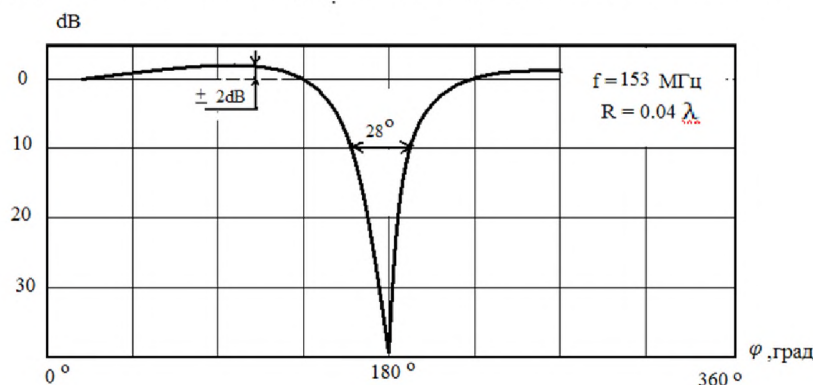
Рис. 4. Функціональна схема компенсатора завад

Атенюатор А на рисунку 4 вирівнює амплітуди полів у дальній зоні від двох фазових мод. Зміна фази фазообертача на  $\varphi$  призводить до азимутального кутового обертання нуля ДН на кут  $\varphi$ . Зміна кутового положення нуля ДСА забезпечується не зміною амплітуд та фаз сигналів для всіх 4-х елементів решітки, а зміною тільки одного фазового зсуву.

Для формування нуля ДН необхідно забезпечити згасання сигналу від сильної компоненти (моди) до рівня сигналу слабкої компоненти і вже потім сигнали від двох компонентів об'єднати. З цього випливає, що результуюче посилення антени (у всеспрямованій частині діаграми) буде приблизно на 3 дБ вище, ніж у слабкій моді. При великому радіусі решітки забезпечується сталість посилення антени на двох модах (не більше 0,15 дБ) у смузі частот більше октави [5].

Наведені результати показують, що ефективність решітки із застосуванням узгоджених навантажень 50 Ом у ДУС забезпечуються у смузі частот  $\pm 10\%$  [5]. Розширення робочої смуги частот (більш ніж  $\pm 20\%$ ) може бути досягнуто застосуванням багатопозиційного атенюатора, який встановлює на кожній робочій частоті необхідне згасання.

У [6] наведені результати експериментального дослідження чотирьохелементних кільцевих решіток радіусом  $0.04\lambda$  на частоті 153 МГц з нулем у ДН (рис. 5), положенням якого можна керувати. Вид ДН для малогабаритних КАР слабо залежить від радіуса решітки, однак при зменшенні радіуса решітки зменшується її коефіцієнт підсилення антени.

Рис. 5. Експериментальна ДН чотирьохелементної антени радіусом  $0.04\lambda$  з керованим нулем

Зазначимо, що глибина нуля прагне до нескінченності (тобто більш ніж на 50 дБ) в кутах, які відповідають розташуванню елементів решітки. Якщо нуль спрямований у куті між елементами решітки, коли існує незначне відхилення від всеспрямованості складових мод, глибина нуля зменшується приблизно до рівня -27 дБ.

Для зменшення ширини провалу (нуля) ДН в [7] пропонується змінити компоновку ДУС. Ширина провалу (виміряна за рівнем -10 дБ) може бути зменшена з  $60^\circ$  до  $28^\circ$ . Це досягається включенням до схеми другого атенюатора А2, який компенсує нерівномірність всеспрямованої ДН. Схему, що забезпечує зменшення ширини нуля ДН (додатковий



вирівнюючий атенюатор) та розширення ширини робочої смуги частот (підключення узгоджених навантажень 50 Ом), наведено на рисунку 6 [7].

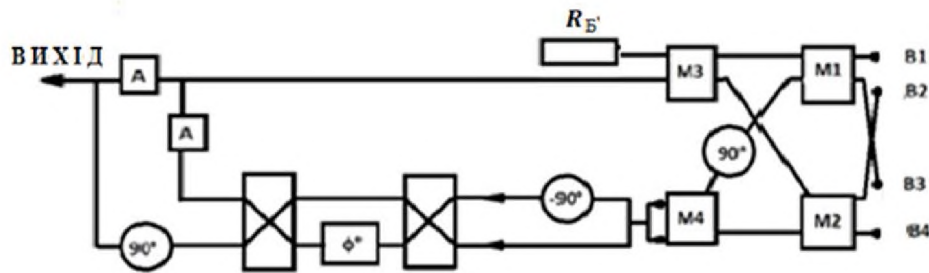


Рис. 6. Широкопasmова функціональна схема компенсатора завад

При максимальному згасанні у атенюаторі А2 схема перетворюється на вид, зображений на рисунку 4, і має такі ж характеристики. Зменшення ширини нуля ДН є причиною зменшення посилення антени для складової ДН з нулем.

**Висновки.** Незважаючи на те, що КАР призначена для заглушення завади, її виходи можливо також використовувати з автоматичними ланцюгами, які управляють напрямком нуля ДН.

Автори зазначають, що описаний тип решітки можна використовувати як приймальну антену з чутливістю до напрямку приходу хвилі (аналог радіопеленгатора). Для цього до виходів двох мод необхідно підключити входи фазового детектора. Вихід фазового детектора можна калібрувати напрямом кута приходу прийнятої хвилі. Сигнал з виходу фазового детектора може бути використаний для автоматичного або адаптивного управління кутовим положенням нуля ДН. Бажано, щоб на систему керування нулем ДН не впливали вид використовуваної модуляції та умов прийому.

Таким чином, реалізація запропонованої схеми побудови антенної системи у вигляді КАР малого діаметра з просторовою адаптацією відносно напрямку приходу завади дозволить суттєво збільшити заводозахищеність радіостанції у мережах зв'язку з рухомими об'єктами.

**Подальші напрямки досліджень** передбачають вивчення можливості практичного застосування пропонованого способу підвищення заводозахищеності. Планується провести експериментальні випробування макета КАР з керованим нулем ДН.

Також планується розглянути можливості використання як дискретних 8 (6)-бітних фазообертачів, так й фазообертачів, які можуть бути побудовані за квадратурною схемою з двома електрично керованими атенюаторами в синфазному та квадратурному каналах. Для виключення залежності роботи системи автоматичного формування нуля ДН від використовуваної модуляції та умов прийому корисного сигналу планується використати незамкнуту систему автоматичного управління (без зворотного зв'язку). При цьому до пам'яті контролера (процесора), який управляє атенюаторами і фазообертачем, завчасно вносяться дані щодо співвідношення рівня сигналу на виході фазового детектора від кута приходу сигналу завади. У пам'яті також зберігаються докладні характеристики пристрою для забезпечення лінійності і компенсації частотної залежності ослаблення. Пристрій, що планується розробити, також повинен врахувати помилки вибірки даних у присутності корисного та заводового сигналів при різних співвідношеннях їхніх потужностей та різних співвідношеннях кутів приходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борисов І. В., Гурський Т. Г., Ільїнов М. Д., Гриценюк К. М. Підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку за рахунок використання адаптивних антенних решіток // Збірник наукових праць ВІПІ. 2015. № 1. С. 16–24.
2. Гриценюк К. М., Гурський Т. Г. Методика формування діаграми спрямованості кільцевої антенної решітки радіостанції мобільної радіомережі в умовах навмисних завад // Збірник наукових праць ВІПІ. 2018. № 3. С. 6–16.
3. Боголій С. М., Гурський Т. Г., Макарчук В. І., Хижий О. І. Підвищення заводозахищеності мобільних радіомереж з використанням технології адаптивного діаграмоутворення // Збірник наукових праць ВІПІ. 2022. № 2 (2). С. 5–14.
4. Davies D.E.N., Rizk M.S.A.S. A broadband experimental null-steering antenna system for mobile communications. Proc/ IERE? 1978, Vol. 48, № 10.
5. Davies D.E.N., Rizk M.S.A.S. A small radius circular array antenna with 3600 null-steering capability/ - Int/ Conf/ Antennas and Propag., London, 1978, p. 60–64.
6. Rahim T., Guy J.R.F., Davies D.E.N. A wideband UHF circular array. – Proceeding of IEE Antennas and Propagation Conference, York, 1981, 13–16 April.
7. Ломан В. И., Нестеренко И. К. Поляризационный компенсатор помех // Известия. вузов. Радиоэлектроника. Том 28. № 3. 1985. С. 59–61.