

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕКТОРНИХ МОДУЛЯТОРІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНOSTІ У ФАЗОВANІЙ АНТЕНNІЙ РЕШІТЦІ

У статті розглянуто можливість застосування векторних модуляторів у колах регулювання фазованих антенних решіток (ФАР) для забезпечення вимог до сучасних систем і засобів радіопеленгування та покращення їх основних технічних характеристик.

Постановка проблеми. Розвиток систем управління і зв'язку зі збереженням тенденції широкого застосування радіоелектронних засобів, який спостерігається останнім часом у збройних силах повідних країн світу, приводить до постійного збільшення кількості джерел радіовипромінювань (ДРВ) різного призначення та розширення їх діапазону робочих частот.

Дані фактори обумовлюють підвищення вимог до систем і засобів визначення місцеположення ДРВ, а саме необхідність збільшення швидкості просторового огляду із одночасним забезпеченням широкого частотного діапазону, дальності ведення моніторингу та заданої кутової роздільної здатності.

Виконання зазначених вимог у сучасних та перспективних радіопеленгаторах (РП) здійснюється із використанням ФАР з електричним способом управління положенням діаграми спрямованості (ДС), яке полягає у зміні амплітудно-фазового розподілу струмів у розкритті ФАР під дією керуючих пристроїв. У переважній більшості ФАР як виконавчі елементи у колах регулювання використовуються фазообертачі (ФО) високої частоти (ВЧ).

Проте більшість ФО ВЧ є пристроями дискретної дії, що призводить до виникнення похибок у визначенні кутового положення ДРВ. Іншим недоліком, зазвичай притаманним ФО ВЧ, є втрати енергії під час проходження через них високочастотного сигналу.

Враховуючи, що в антенній системі (АС) РП фазообертачі працюють на низькому рівні потужності, можливим шляхом усунення вказаних недоліків є застосування за керуючі елементи векторних модуляторів (ВМ).

Огляд останніх досліджень. Питанням розгляду принципів дії та можливих сфер застосування ВМ присвячено низку робіт [1 – 3]. Однак джерел, у яких би розглядався варіант їх використання саме як керуючих елементів у ФАР для управління положенням ДС авторами не знайдено.

Метою статті є розгляд шляхів вирішення проблеми забезпечення вимог до сучасних систем і засобів радіопеленгування шляхом використання ВМ у колах регулювання ФАР.

Виклад основного матеріалу. Як зразок ВМ в інтегральному виконанні розглянемо розроблені фірмою Analog Devices інтегральні мікросхеми (ІМС) AD8340, AD8341 та ADL5390 [1, 2]. На рис. 1 наведено спрощену структурну схему ВМ AD8340 та AD8341.

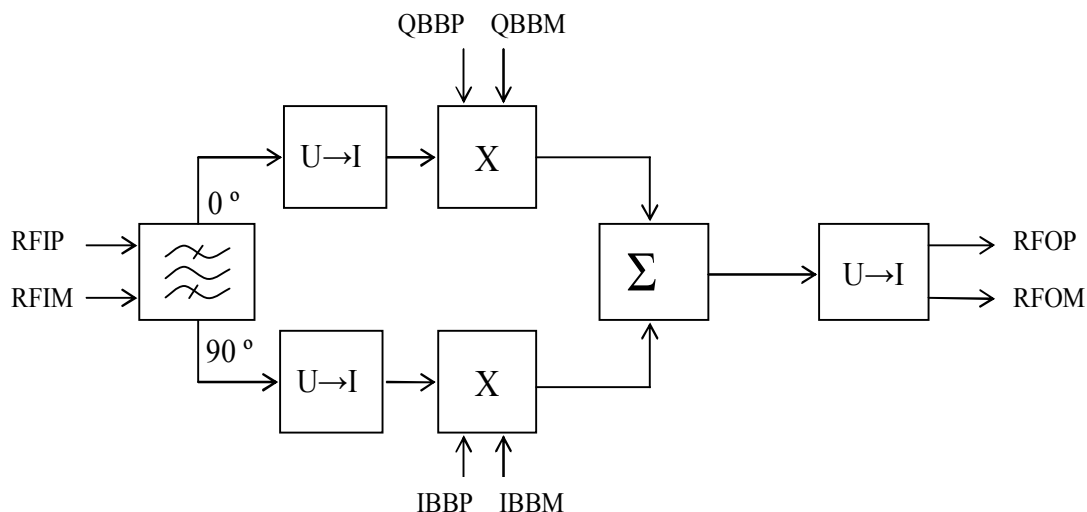


Рис. 1. Спрощена структурна схема векторних модуляторів AD8340 та AD8341

До складу структурної схеми цих ВМ входять такі елементи:

фазовий розщеплювач 90° (спліттер), позначений на схемі як смуговий фільтр з комплексним виходом, на вхід якого (RFIP, PFIM) подається немодульоване коливання ВЧ або модульований сигнал ВЧ;

два помножувачі (X), які мають по два входи, один з яких поєднаний з виходом розщеплювача, а інший – з виводами ІМС, на які подається модулюючий диференційований (I/Q) сигнал (IBVP, IBVM та QBVP, QBVM відповідно);

суматор (Σ), кожний з двох входів якого підключений до виходу одного з помножувачів. Крім того, у складі ВМ є перетворювачі напруги в струм ($U \rightarrow I$) для узгодження опорів структурних елементів схеми.

Структурна схема векторного помножувача ADL5390 відрізняється від наведеної схеми ВМ відсутністю в його складі фазового розщеплювача, який визначає частотні характеристики ВМ за входом ВЧ. Для ІМС AD8340 частотний діапазон за входом ВЧ становить від 0,7 до 1 ГГц, для ІМС AD8341 – від 1,5 до 2,4 ГГц, а для векторного помножувача ADL5390 з використанням зовнішнього фазового розщеплювача (наприклад, QCN-12 фірми Minicircuits) – від 0,02 ГГц до 2,4 ГГц. Частота регулювання та модуляції за управляючим входом становить від 0 до 230 МГц.

ІМС ADL5390 призначена для використання в таких режимах:

підсилення з регулюванням коефіцієнта передачі в межах 35 дБ (від +5 дБ до -30 дБ) та обертання фази з регулюванням у межах 360° ;

амплітудної та фазової модуляції в таких самих межах;

комутації та додавання двох різних сигналів;

формування амплітудних та фазових передспотворень.

Між першими двома режимами, які є основними, немає суттєвої різниці. Однак перший можна вважати статичним, оскільки ВМ ADL5390 працює при сталих значеннях коефіцієнта передачі та фазового зсуву, а другий – динамічним, коли управляюча напруга є часовою функцією модуляції та може здійснюватися, наприклад, за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) під управлінням ПЕОМ.

Залишаючись по суті балансним модулятором, ВМ має додаткові властивості, які розширюють його технічні можливості. Насамперед високочастотний вхід ВМ, який для звичайних квадратурних модуляторів є входом несучого високочастотного коливання, є

лінійним, а тому на нього може бути подане модульоване колювання з метою подальшої його модуляції за входами. Ця обставина дозволяє доповнювати модульований вхідний сигнал ВЧ необхідним додатковим фазовим зсувом без впливу на інші його характеристики.

На рис. 2 показані сигнали в колах ADL5390, які ілюструють процеси, що відбуваються в ІМС у першому режимі, та векторні діаграми, які відповідають зазначеним процесам.

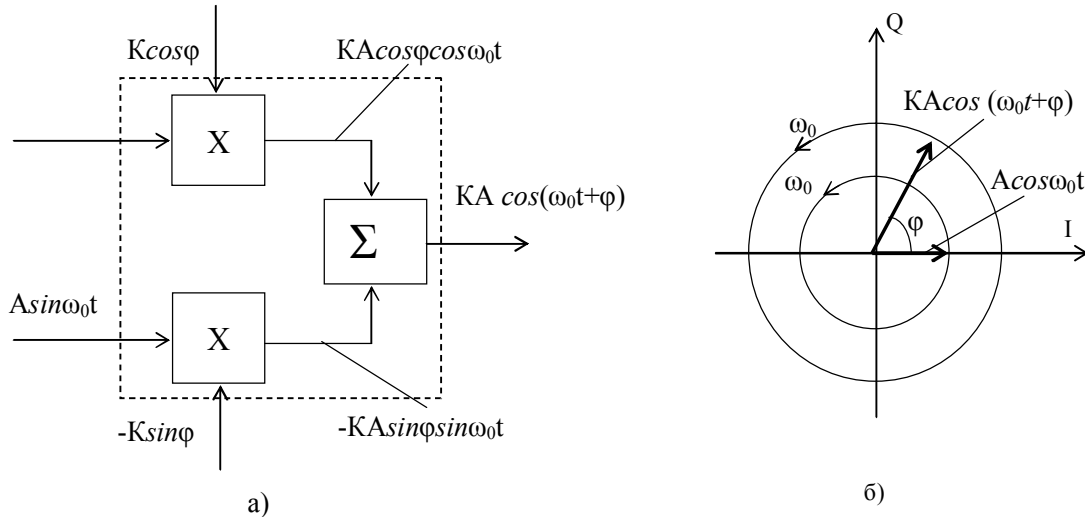


Рис. 2. Використання ІМС ADL5390 як ФО:
а) структурна схема; б) векторна діаграма

На високочастотний вхід ВМ з фазового розщеплювача подаються вхідний сигнал $A \cos \omega_0 t$ та його квадратурна складова $A \sin \omega_0 t$, а на управляючі входи – постійні напруги $U_I = K \cos \varphi$ та $U_Q = -K \sin \varphi$, які визначають потрібні коефіцієнт передачі K та фазовий зсув φ . На виході помножувачів отримаємо $K A \cos \varphi \cos \omega_0 t$ та $-K A \sin \varphi \sin \omega_0 t$, а на виході суматора ІМС відповідно $K A \cos(\omega_0 t + \varphi)$.

Вихідний сигнал у порівнянні з вхідним збільшився в K разів та набув фазовий зсув φ . Таким чином, змінюючи параметри управляючої напруги, можна отримати необхідне підсилення сигналу та його фазовий зсув, а зробивши коефіцієнт підсилення та фазовий зсув функціями часу, можна отримати режим динамічного управління.

Розглянемо можливість використання описаних властивостей ВМ для управління положенням ДС ФАР. Отримання спрямованих властивостей будь-якої антени ґрунтується на явищі інтерференції електромагнітних хвиль. У тому напрямку, де хвилі підсилюють одна одну, утворюється головний максимум випромінювання, в інших напрямках хвилі від різних ділянок антени в тій чи іншій мірі гасять або послаблюють одна одну. Для отримання головного максимуму ДС із заданими параметрами у визначеному напрямку потрібно створювати необхідний розподіл амплітуд та фаз напруженості полів у площині розкриття ФАР [3].

Зосередимо увагу на ФАР з фідерним живленням та фазовим скануванням. При фазовому способі управління положенням ДС ФАР фази окремих випромінювачів змінюються відповідно до заданого закону за допомогою ФО з електричним управлінням, ліній затримки сигналів або інших фазозсувних пристроїв. Зміна фазових зсувів між випромінювачами приводить до зміни положення головного максимуму ДС решітки.

Існують дві основні схеми побудови решіток з фазовим управлінням – послідовна та паралельна. Розглянемо можливості використання як ФО ВМ при збереженні переваг, характерних кожній із схем.

При послідовній схемі управління ДС ФАР (рис. 3) однакові ФО вмикаються між сусідніми елементами, тому для управління усіма ФО потрібен тільки один (однаковий) управляючий сигнал. Отже, система управління ФАР дуже проста, що і є основною перевагою послідовної схеми.

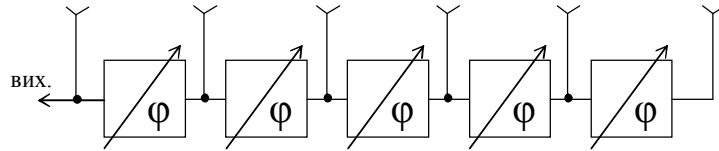


Рис. 3. Послідовна схема управління у ФАР

Основними недоліками схеми є:

значні втрати потужності сигналу у ФО;

накопичення помилок послідовно поєднаними ФО і, як наслідок, підвищені вимоги до точності настроювання кожного окремого керуючого елемента.

При використанні ВМ як ФО для усунення першого недоліку втрати потужності сигналу при проходженні через послідовно з'єднані елементи можуть бути компенсовані шляхом вибору коефіцієнта передачі ВМ з відповідним підсиленням.

Використання ВМ у режимі ФО забезпечує точність встановлення фази в робочому діапазоні частот не гірше 1° . З урахуванням можливого відхилення фази від заданої величини накопичена похибка становитиме одиниці градусів. Використання динамічного режиму управління ФО за допомогою ПЕОМ робить переміщення ДС квазібезперервним, а частотний діапазон сигналів управління дозволяє переміщувати її в потрібне положення майже миттєво.

Таким чином, використання ВМ як ФО при послідовній схемі управління ДС ФАР в РП є цілком доцільним.

При паралельній схемі управління ФАР (рис. 4) загальний канал утворюється шляхом поєднання потужності сигналів з N паралельних гілок, до кожної з яких включений ФО.

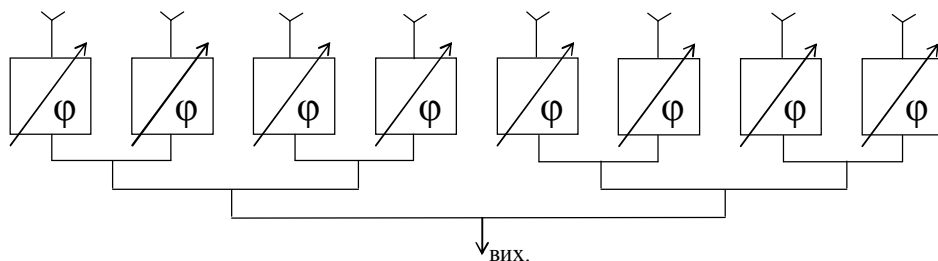


Рис. 4. Паралельна схема управління у ФАР

Основні переваги схеми полягають у проходженні через кожний елемент ФАР $1/N$ частини загальної потужності сигналу, тому загальні втрати енергії приблизно дорівнюють втратам енергії в одному ФО. Вимоги до стабільності встановлення фази окремими ФО значно послаблені, оскільки при такому варіанті їх поєднання накопичення помилок не відбувається.

Основними недоліками наведеної схеми є:

складність системи управління ФАР (кожний ФО управляється за своїм законом);
 великий потрібний діапазон зміни фази ФО при необхідності формування вузьких ДС. Наприклад, якщо сектор сканування перевищує ДС у 20 разів, фаза в крайніх елементах ФАР повинна змінюватися від -1800° до $+1800^\circ$. На практиці типовий діапазон зміни фази ФО становить до 2π [3].

Використання ВМ як ФО в паралельній схемі управління прямо не вказує на досягнення суттєвих переваг перед іншими його типами. Звичайно, можна включити послідовно необхідну кількість ВМ у гілку окремого випромінювача з діапазоном зміни фази 2π , компенсуючи можливі втрати енергії сигналу, але це призведе до накопичення помилок встановлення фази та зайвих шумів. ВМ доцільно використати в схемі управління фазовим розподілом у ФАР з так званим „скиданням” фази на величину, кратну 2π . Але це додатково ускладнить схему управління ФАР. Крім того, схема зі „скиданням” фази має принциповий недолік – решітка стає вузькосмуговою [4], що не відповідає основним вимогам до ФАР у разі використання її як АС РП системи радіомоніторингу. Широкопосмуговість ФАР визначається конструктивними характеристиками решітки, частотними характеристиками елементів, що застосовуються у тракці ВЧ, та умовами забезпечення частотно-незалежного переміщення ДС у заданих межах.

Для забезпечення частотно-незалежного сканування застосовується так званий часовий спосіб сканування з використанням „часових фазообертачів”, який можна розглядати як різновид фазового способу управління ДС. При такому способі (рис. 5) у кожний із каналів решітки включають керовані лінії затримки (КЛЗ).

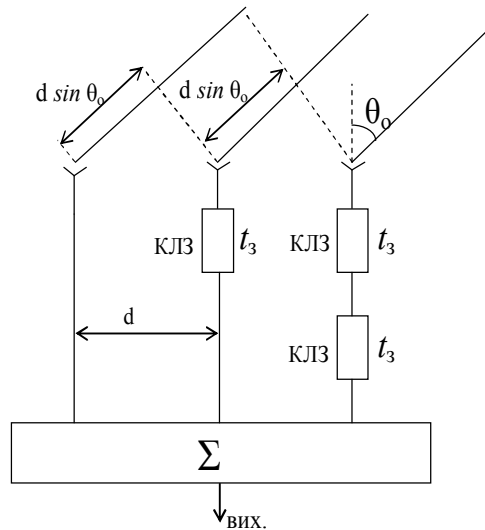


Рис. 5. Часовий спосіб частотно-незалежного сканування

Якщо час затримки t_3 визначити як

$$t_3 = \frac{d \sin \theta}{c},$$

де c – швидкість світла;

d – відстань між елементами ФАР;

θ – кут відхилення ДС,

то сигнали, прийняті окремими елементами з напрямку нормалі до площини антенної решітки θ_0 , будуть у спільному фідерному тракці повністю суміщені у часі. Це забезпечує

широкосмуговість ФАР як щодо положення головного максимуму ДС, так і форми сигналу.

Найчастіше „часовий фазообертач” є системою відрізків радіочастотного кабелю, які підключаються в канали приймальних елементів за допомогою спеціального комутатора. При такій конструкції КЛЗ ДС переміщується стрибкоподібно. Враховуючи, що ВМ у межах робочого діапазону частот є широкосмуговим елементом, він може виконувати роль КЛЗ та в режимі динамічного управління забезпечити плавне переміщення ДС у заданому секторі у межах зазначеного частотного діапазону. Заміна КЛЗ на ВМ доцільна і з міркувань, пов’язаних з наявністю певних труднощів при реалізації часового способу сканування традиційними засобами.

У великогабаритних решітках загальний час затримки для крайніх елементів, який визначається як

$$t_3 = \frac{d(N-1)\sin\theta}{c},$$

де N - кількість елементів,

є значним, система КЛЗ з комутатором стає громіздкою. Крім того, у цій системі необхідно мати КЛЗ з високою відносною точністю встановлення потрібної затримки. Наприклад, для суміщення сигналів з точністю не гірше 10° та компенсації затримки сигналів за апертурою на 50 періодів ВЧ ($L = 100\lambda, \theta = 30^\circ$) потрібно встановити затримку з відносною точністю $\frac{10^\circ}{50 \times 360^\circ} = 0,06\%$, що здійснити без спеціальних стабілізуючих пристроїв вкрай складно [3]. Це додатково свідчить про доцільність заміни КЛЗ на ВМ.

Можливим варіантом забезпечення заданої широкосмуговості ФАР є її використання з часовою компенсацією затримки на проміжній частоті (ПЧ). У цьому випадку можна використовувати КЛЗ з більшими власними втратами та меншою точністю регулювання. Це пов’язано з тим, що неточності регулювання часу затримки на ПЧ вносять фазові похибки у $\frac{\omega_{ВЧ}}{\omega_{ПЧ}}$ разів менше, ніж на ВЧ. Однак при використанні КЛЗ на ПЧ у схему необхідно додати керовані ФО, як показано на рис. 6.

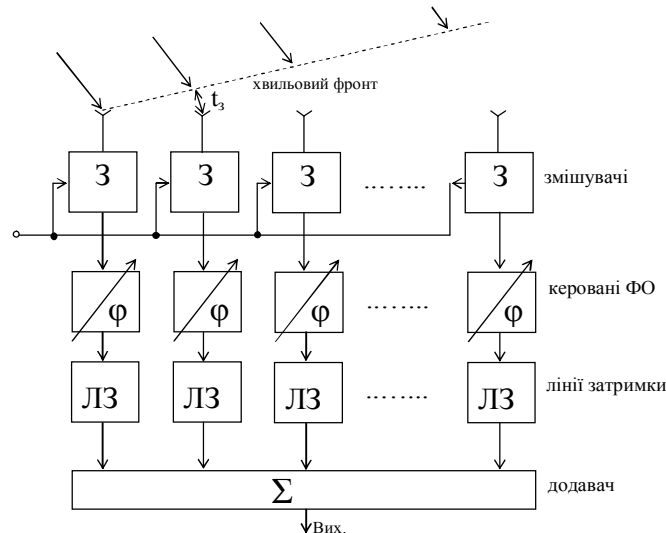


Рис. 6. Часовий спосіб частотно-незалежного сканування на проміжній частоті

Так, при запізненні сигналів, прийнятих сусідніми елементами, на час t_3 , різниця фаз прийнятих сигналів на ВЧ буде $\Delta\varphi_{ВЧ} = \omega_{ВЧ}t_3$,

Час запізнення t_3 компенсується за допомогою КЛЗ на ПЧ, відповідна різниця фаз $\Delta\varphi_{ПЧ}$ змінюється на величину

$$\Delta\varphi_{ПЧ} = \omega_{ПЧ}t_3 \neq \Delta\varphi_{ВЧ}.$$

Отже, для забезпечення синфазності сигналів після компенсації потрібно додатково здійснити зсув фаз прийнятого сигналу на величину, яка розраховується як

$$\Delta\varphi_{\Phi O} = (\omega_{ВЧ} - \omega_{ПЧ})t_3 = \omega_{Г}t_3, \quad (1)$$

де $\omega_{Г}$ - частота гетеродину.

Як видно з (1), величина $\Delta\varphi_{\Phi O}$ не залежить від несучої $\omega_{ВЧ}$, що забезпечує широкосмуговість ФАР при переході від КЛЗ на ВЧ до КЛЗ на ПЧ. Як ФО ФАР, побудованих за даною схемою, пропонується використати ВМ у динамічному режимі, а залежно від значення ПЧ – і як КЛЗ.

Важливою складовою ФАР, незалежно від схеми їх побудови, є керуючі пристрої, більшість з яких є дискретними, а їх корисна дія пов'язана з деяким загасанням хвиль. Тому амплітудно-фазовий розподіл у розкритті ФАР при дискретному регулюванні відрізняється від потрібного, що, у свою чергу, призводить до зменшення коефіцієнта спрямованої дії ФАР та утворення так званих комутаційних бокових пелюсток ДС [3, 4]. Використання ВМ у схемі управління ФАР дає змогу з припустимою складністю перейти від дискретного керування до квазібезперервного та реалізувати так звану „чисту” ДС. Цьому також сприяє можливість встановлювати за допомогою ВМ не тільки необхідний фазовий, а й амплітудний розподіл сигналів у розкритті ФАР.

Висновки. Таким чином, використання ВМ як ФО у ФАР з фазовим регулюванням положення ДС дає змогу:

забезпечити підвищення коефіцієнта спрямованої дії та зменшення рівня бокових пелюсток у порівнянні з ФАР, де використовуються традиційні керуючі елементи;

скоротити час переміщення ДС у будь-яке положення у межах сектора сканування завдяки широкосмуговості управляючого входу;

спростити схему управління ДС ФАР за рахунок управління окремими ФО на основі ВМ за допомогою ЦАП від ПЕОМ або спеціалізованого цифрового керуючого пристрою;

спростити реалізацію схеми часового сканування на ПЧ, поєднавши з одночасним перенесенням більш високочастотного робочого діапазону ФАР у діапазон роботи ВМ, наприклад, з сантиметрового діапазону хвиль у дециметровий, що може спростити подальшу обробку прийнятого сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шифрин Я. С. Антенны / Я. С. Шифрин. – К. :– ВИРТА,1976. – 407 с.
2. Голубь В. Векторные модуляторы AD8340/1 фирмы Analog Devices / В. Голубь // Chip News Украина. – 2004. – № 2. – С. 22 – 25.

3. Голубь В. Векторный перемножитель ADL5390 фирмы Analog Devices / В. Голубь // Chip News Украина. – 2004. – № 8. – С. 24 – 27.
4. Вендрик О. Г. Антенны с электрическим сканированием / О. Г. Вендрик, М. Д. Парнес. – М. : САЙНС – ПРЕСС, 2002. – 231 с.

Подано 20.10.09

Ю. Л. Бондаренко, Н. С. Поляков

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ МОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ В ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ**

В статье рассмотрена возможность применения векторных модуляторов в цепях регулирования фазированных антенных решеток (ФАР) для обеспечения требований к современным системам и средствам радиопеленгования и улучшения их основных технических характеристик.

Y. L. Bondarenko, M. S. Polyakov

**VECTOR MODULATOR APPLICATION FOR CONTROLLING OF RADIATION
PATTERN OF PHASED ANTENNA ARRAY**

The article deals with the possibilities of vector modulator application in the areas of phased antenna array regulation for ensuring demands for modern systems and means of taking radio bearings and improving their main engineering characteristics.