

УДК 621.396.967

Д.П. Пашков<sup>1</sup>, С.В. Домнін<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний університет оборони України, Київ<sup>2</sup>Центр контролю космічного простору, Євпаторія

## ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПЕРЕШКОД В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ БІЧНОГО ОГЛЯДУ З СИНТЕЗУВАННЯМ АПЕРТУРИ АНТЕНИ

Якість формованого радіолокаційною станцією бічного огляду з синтезуванням апертури антени (РСА) зображення (РЛЗ) радіолокації багато в чому визначається роздільною здатністю РСА. На роздільну здатність РСА робить істотний вплив рівень шумів і перешкод в системі. Зниження міри їх впливу є важливим завданням. З цією метою пропонується вживання адаптивного компенсатора перешкод в РСА для поліпшення якості отриманого РЛЗ.

**Ключові слова:** радіолокаційне зображення, радіолокаційна станція з синтезуванням апертури, шуми.

### Вступ

Вживання даних дистанційного зондування Землі для вирішення навігаційних завдань стимулює поліпшення якості використовуваної інформації, і у свою чергу веде до пошуку нових методів вдосконалення космічних апаратів і всієї системи в цілому. Формування якісного РЛЗ безпосередньо залежить від роздільної здатності РСА. Роздільна здатність такої системи зйомки поверхні Землі залежить від точності вимірів різниці часів запізнювання сигналів і різниці доплерівських частот. Досягнення високого дозволу залежить від упевненого і точного прийому відбитого зондуючого сигналу на тлі різних шумів і перешкод. У зв'язку з цим необхідно застосовувати в РСА спеціальні заходи по компенсації їх впливу.

**Аналіз літератури.** Аналіз наукової літератури показує, що в даний час проблема шумів і перешкод, а також способи їх пониження і компенсації впливу в радіолокації вивчені досить добре. В той же час, підлягає подальшому вивченню вживання різних способів компенсації шумів і перешкод в РСА. Зокрема – вживання в РСА автокомпенсаційного методу.

**Метою статті** є вивчення можливості вживання в РСА автокомпенсаційного методу і розробка можливого методу компенсації перешкод за допомогою адаптивного компенсатора, з метою поліпшення технічних характеристик РСА і підвищення якості РЛЗ.

### Основний розділ

В тому випадку, якщо нехтувати шумами дискретизації, квантування і обмеження, що виникають в аналого-цифровому перетворювачі, то можна вважати, що в РСА мають місце наступні основні види шумів: тепловий шум і шум зернистості (спекл-шум).

Формування відбитого сигналу, його перетворення і посилення супроводиться появою шумів. Прийнято вважати, що в простому випадку ці шуми близькі до адитивного білого шуму гауса з нульовим

математичним чеканням [1, 2]. Тепловий шум за своєю природою є адитивним і обумовлений певною шумовою температурою на вході приймального пристрою. Підвищити відношення сигнал-шум можна або шляхом збільшення потужності випромінювання РЛС, або шляхом зменшення шумової температури приймача. Пропонується спробувати вирішити цю проблему вживанням в РСА адаптивного компенсатора перешкод. Питання зменшення впливу шуму зернистості в даній статті не розглядається.

Накопичення корисного відбитого сигналу в РСА на інтервалі синтезування (ІС) забезпечує поліпшення відношення сигнал-шум і об'єднання ІС в єдину синтезовану апертуру. При цьому відбувається і підвищення роздільної здатності РСА. Таке накопичення забезпечує поліпшення відношення сигнал-шум на виході системи обробки РСА аналогічно роботі погодженого фільтру. З теорії радіотехніки відомо, що оптимальний фільтр тим ефективніше, чим більше тривалість імпульсного сигналу і менше ширина його спектру. Але для підвищення роздільної здатності РСА і поліпшення якості РЛЗ необхідно застосовувати ширококутові сигнали і прагнути до зменшення тривалості зондуючих імпульсів, що у свою чергу наводить до пониження енергетики, зменшенню відношення сигнал-шум і погіршенню перешкодозахищеної. Для вирішення даного протиріччя, з метою підвищення роздільної здатності РСА і якості РЛЗ пропонується використання зондуючих імпульсів малої тривалості і високої амплітуди спільно із застосуванням спеціальних заходів по забезпеченню підвищення перешкодозахищеної системи. З цією метою пропонується використання в РСА адаптивного компенсатора перешкод (АКП), якого дозволяють усувати вплив навіть корельованих з корисним сигналом перешкод. Необхідно відзначити, що коректне вживання АКП дозволяє забезпечити найвищу і практично недосяжну для інших відомих методів міру придушення вельми широкого

плану перешкод при майже повному виключенні можливих спотворень корисних сигналів.

Розглянемо найважливіші характеристики автокомпенсаційних методів придушення перешкод. На рис. 1 представлена структурна схема загальної функціональної моделі автокомпенсатора перешкод.

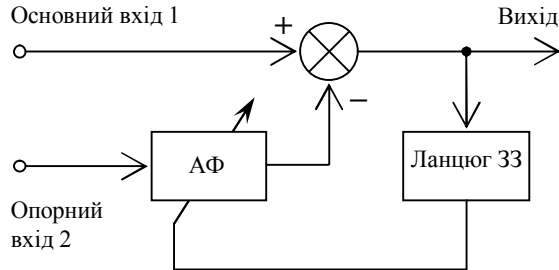


Рис. 1. Загальна функціональна модель автокомпенсатора перешкод:

АФ – адаптивний фільтр; ЦОС – ланцюг зворотного зв'язку; 1 і 2 – умовне позначення, відповідного, основного та опорного входів автокомпенсатора

При цьому на основний вхід 1 подається вхідний сигнал, що стоїть з відбитого корисного сигналу і перешкод

$$V1(t) = S(t) + X(t) + Y(t), \quad (1)$$

а на опорний вхід 2 поступає сигнал, що заважає:

$$V2(t) = Z(t) + N(t), \quad (2)$$

де  $S(t)$  – корисний сигнал;  $X(t)$  і  $Z(t)$  – корельовані перешкоди;  $Y(t)$  і  $N(t)$  – статистично не взаємозв'язані дії.

Загальне рішення задачі адаптивної компенсації перешкод (в даному випадку – сигналу, що заважає,  $X(t)$ ) може бути записане у вигляді:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(t)Z(t) = X(t); \quad \forall t \in [0, \infty], \quad (3)$$

де  $W(t)$  – змінна в часі імпульсна характеристика адаптивного фільтру (АФ).

При побудові адаптивного компенсатора перешкод представляється доцільним виділити наступні основні аспекти проблеми автокомпенсації:

- вибір типу автокомпенсації і методу придушення перешкод;
- обґрунтування алгоритму адаптації (перебудови адаптивного фільтру);
- розробка модифікацій автокомпенсаторів перешкод з метою підвищення їх точностних, динамічних і інших характеристик;
- синтез раціонального способу організації опорного входу (формування опорних сигналів).

Все чотири ці завдання, як правило, переважно вирішувати спільно, тобто в комплексі.

По мірі можливості найважливіші різновиди автокомпенсаційних методів придушення перешкод умовно можуть бути розділені на два великі класи:

1. Автокомпенсатори (АК) з відніманням корельованої перешкоди  $Z(t)$  з вхідної суміші  $V1(t)$  корисного  $S(t)$  і що заважають  $X(t)$  і  $Y(t)$  сигналів.

2. Адаптивні антенні решітки (ААР) з автоматичним підстроюванням нулів діаграми спрямованості даних решіток у напрямі джерел перешкод, що компенсуються.

Очевидна умовність даної класифікації, оскільки з одного боку, формування нулів діаграми спрямованості з кутовими координатами джерела перешкод здійснюється складанням протифази даного сигналу, що заважає, з компенсуючою дією. А з іншого боку, антенні решітки також можуть працювати в режимі автокомпенсатора з простим відніманням перешкоди. У останньому випадку для опорного входу виділяється зазвичай сегмент фазованих антенних решіток, а остання частина решіток використовується як основний вхід. У теж час при функціонуванні решіток як ААР і опорний, і основний входи організуються шляхом відповідної обробки сигналів від кожного з елементів решіток. Це, мабуть, і є основною відмінністю потенційно ефективнішою ААР від АК. Оцінимо вплив некорельованих перешкод  $Y(t)$  і  $N(t)$  на якість компенсації корельованого сигналу, що заважає,  $X(t)$ .

З цією метою введемо наступні позначення:  $A(f) = [Y(f)/X(f)]^2$  і  $B(f) = [N(f)/Z(f)]^2$ . Тоді можна показати, відношення  $P(f)$  спектральної потужності корельованої перешкоди на основному вході до спектральної потужності цієї перешкоди на виході автокомпенсатора може бути знайдене з вираження:

$$P(f) = \frac{[A(f) + 1][B(f) + 1]}{A(f) + A(f)B(f) + B(f)}. \quad (4)$$

Якщо при цьому  $A(f) = B(f) = 0$ , то ефективність автокомпенсатора дорівнює нескінченності, тобто його вживання забезпечує повне придушення корельованої перешкоди без яких-небудь спотворень корисного сигналу. В разі великих значень  $A(f)$  і  $B(f)$  ефективність автокомпенсатора стає рівній одиниці, що еквівалентно автоматичному відключенню даного компенсатора. Таким чином, коректне використання автокомпенсаторів перешкод не наводить до спотворення корисних сигналів, що приймаються. Також можна відзначити, що в загальному випадку може мати місце і «просочування» корисного сигналу на опорний вхід 2 автокомпенсатора перешкод. Позначивши відношення сигнал-шум на опорному вході і на виході даного автокомпенсатора через  $\rho'_c$  і  $\rho''_c$ , відповідно, можна записати

$$\rho''_c = 1 / \rho'_c. \quad (5)$$

Таким чином, реальний вииграш від вживання автокомпенсаторів перешкод назад пропорційний величині відношення сигнал-шум на його опорному вході. При цьому погіршеність адаптації включає статичну і динамічну помилки, причому зростання коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку автокомпенсатора перешкод наводить до пропор-

ційного збільшення дисперсії статичної помилки і, навпаки, до відповідного зменшення дисперсії динамічної помилки. В цілому, якість придушення перешкод за допомогою стандартного автокомпенсатора залежить від ширини його смуги пропускання, величини коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку, рівня внутрішніх шумів, міри неідеальності характеристик і ширини динамічного діапазону елементів даного компенсатора і тому подібне

В даний час розроблена чимала кількість модифікацій схемотехнік автокомпенсаторів перешкод, що мають на меті поліпшити ті або інші характеристики стандартної схеми компенсатора. Необхідність і практична доцільність використання того або іншого різновиду модифікацій схемотехнік автокомпенсаторів перешкод або їх поєднань визначається конкретними умовами вживання, вимогами до надійності і якості придушення перешкод, а також параметрами корисних сигналів, що заважають (що компенсуються).

Для вживання автокомпенсатора перешкод в РСА пропонується використовувати поєднання двох відомих модифікацій компенсаторів. По-перше, для поліпшення якості отриманого зображення і забезпечення коректної побудови РЛЗ необхідно забезпечити роботу РСА в чималому динамічному діапазоні. Зв'язано це з тим, що при формуванні РЛЗ РСА доводиться обробляти великий потік відбитих сигналів від

самих різних цілей на сканованій поверхні. При цьому амплітуда відбитих сигналів може змінюватися в широких межах. Різні цілі і ділянки сканованої місцевості можуть мати що вельми відрізняються як питому відзеркаловальну поверхню (УОП), так і ефективну відзеркаловальну поверхню (ЕОП). Діапазон зміни УОП дуже великий і складає близько 80 дБ (від  $10^{-5}$  для водної поверхні до  $10^3$  для промислових забудов). При цьому ЕОП об'єктів теж може сильно змінюватися, наприклад, від одиниць (автомобіль) до декількох тисяч (крупний корабель) [3]. Тому для здобуття якісного РЛЗ і коректної роботи РСА її динамічний діапазон повинен відповідати ширині динамічного діапазону УЕП з врахуванням зміни ЕОП. По-друге, для коректної роботи АКП в РСА необхідно забезпечити його достатню швидкодію. У зв'язку з цим пропонується застосувати поєднання багатокільцевого АКП з автокомпенсатором з фіксованою швидкодією.

Загальна схема багатокільцевого компенсатора, призначеного для розширення динамічного діапазону придушення перешкод представлена на рис. 2. Такий автокомпенсатор забезпечує априорі задану якість виділення корисного сигналу, причому:

$$D_n = \bigcup_{i=1}^n D_i \quad \forall i_1 \neq i_2; i_1, i_2 \in [1, n], \quad (6)$$

де  $D_i$  – динамічний діапазон  $i$ -го кільця компенсатора.

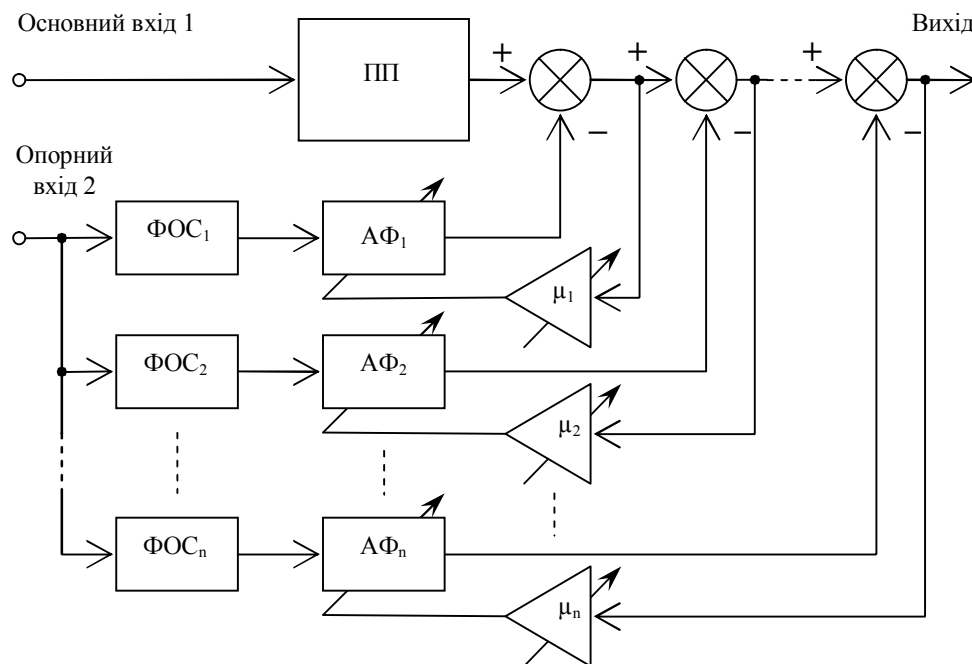


Рис. 2. Багатокільцевий автокомпенсатор з розширеним динамічним діапазоном

На рис. 2: РП – радіоприймач (в частоті вхідний тракт приймача сигналів РСА); АФ – адаптивний фільтр;  $\mu_i$  – коефіцієнт передачі ЦОС  $i$ -го кільця автокомпенсатора; ФОС – формувач опорного сигналу, що включає в себе дискримінатор рівней вхідних дій.

Для вживання в РСА, в схемі автокомпенсатора з розширеним динамічним діапазоном ланцюг зворотного зв'язку може бути побудований за принципом автокомпенсації з фіксованою (не залежним від рівня пригнічуваної перешкоди) швидкодією (рис. 3). Це забезпечує необхідну швидкодію систе-

ми і досягається оперативним контролем поточного рівня перешкоди, що компенсується, і відповідним регулюванням коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку в реальному масштабі часу. При цьому

величина коефіцієнта передачі ланцюга зворотного зв'язку змінюється прямо пропорційно потужності перешкоди, що компенсується

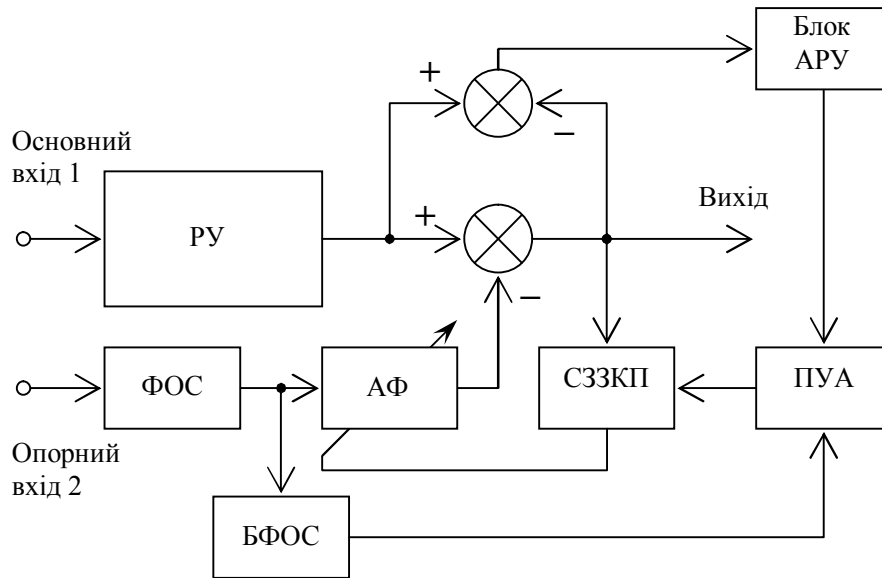
$$\mu(t) \sim [|X(t)|]^2. \quad (7)$$


Рис. 3. Автокомпенсатор із фіксованою (не залежною від рівня пригнічуваної перешкоди) швидкодією

На рис. 3: СЗЗКП – схема зворотного зв'язку з коефіцієнтом передачі, що перестовується; ПУА – пристрій управління адаптацією; БФОС – блок формування обмежувального сигналу.

Розглянемо основні методи організації опорного входу. Відзначимо, що практично всі способи формування опорних сигналів АК і ААР засновані на використанні тих або інших апріорно-відомих відмінностей (або їх поєднань) корисних сигналів від компенсуються дій, що заважають. При цьому представляється доцільним виділити наступні основні принципи розділення (відмітні ознаки) корисних сигналів, що заважають:

1. Просторове розділення;
2. Поляризаційне розділення (з цієї точки зору найбільш переважною є кругова поляризація корисних сигналів);
3. Тимчасове розділення (наприклад, крізперіодна компенсація перешкод або стробування нулів імпульсних сигналів, що заважають, і тому подібне);
4. Частотне розділення;
5. Нелінійне розділення (засноване на декорельюючих властивостях нелінійних перетворень);
6. Статистичне розділення (передбачаюче формування деякої еталонної дії, що сильно корелюється з корисним сигналом і статистично не взаємозв'язаного або слабкорельюваного з перешкодою, що компенсується).

Слід зауважити, що практично всі (за винятком двох останніх) вказані вище принципи відділення корисного сигналу від перешкоди, що компенсується, є досить добре відомими, такими, що порівняно просто

реалізуються практично і широко використовуваними в сучасній техніці придушення дій, що заважають, за допомогою автокомпенсаційних методів. Вживання даних методів передбачає наявність відповідного (просторового, тимчасового, частотного і тому подібне) фільтру для селекції корисних або таких, що заважають сигналів. У загальному випадку необхідні також пристрої відстежування можливих змін параметрів вказаних сигналів. При цьому корисний сигнал і перешкода, що компенсується, мають бути взаємно-ортогональними, тобто надійно розділними по просторових, тимчасових, частотних, поляризаційних і іншим параметрам, оскільки втрати енергії корисного сигналу із-за його пересічення з тим, що заважає по селектуємії координаті наводять до спотворення корисного сигналу і до зниження якості компенсації перешкод.

Таким чином, формалізована умова застосовності перших чотирьох принципів розділення корисних сигналів і перешкод, що компенсуються, може бути записана в наступному вигляді:

$$\left| \int_{V_\theta} S(\theta)X(\theta)d\theta \right| \leq \alpha_c \rightarrow 0, \quad (8)$$

де  $\theta$  – просторова, тимчасова, частотна, поляризаційна і тому подібне координата;  $\alpha_c$  – деяка апріорно-задана величина, що характеризує максимально допустиму міру взаємного «розуміння» корисного  $S(\cdot)$  і що заважає, що компенсується,  $X(\cdot)$  сигналів по координаті  $\theta$ ;  $V_\theta$  – область визначення параметра  $\theta$  (у загальному випадку – векторного).

Необхідно відзначити недостатність теоретичного і практичного опрацювання питань нелінійного

і статистичного розділення корисного і заважають сигналів, що компенсуються. Загальна умова застосовності нелінійного відділення сигналів від перешкод може бути записана так:

$$\alpha_{\zeta} \geq \left| \int_{V\theta} K\{S(\theta), X(\theta)\}d\theta \right| \ll \int_{V\theta} S(\theta)X(\theta)d\theta, \quad (9)$$

де  $K\{\cdot\}$  – оператор нелінійного (у загальному випадку інерційного) перетворення спеціального вигляду.

Загальнішими і такими, що порівняно просто реалізуються є методи статистичного розділення корисного сигналу від перешкод, що компенсуються. При цьому можливі два основні варіанти методу:

- постійне формування опорного сигналу;
- періодичне формування опорного сигналу.

Перший варіант може бути використаний лише в разі вживання корисних сигналів спеціального вигляду, зокрема ширококугових або вузькокугових сигналів шумоподібної структури. Умовою застосовності другого варіанту, тобто статистичного розділення з періодичним формуванням опорного сигналу є відносна стаціонарність перешкод, що компенсуються. При цьому тривалість періоду стаціонарних перешкод повинна перевищувати періодичність передачі опорного сигналу.

В цілому необхідно відзначити, що практичне використання описаних методів формування опорних сигналів дозволяє реально забезпечити навіть в простому випадку вживання одноканального автокомпенсатора глибину придушення перешкод від (20-30) дБ для АК і до (50-60) дБ для ААР. При цьому забезпечується можливість каскадного складання ефективності автокомпенсаційного методу з іншими методами підвищення перешкодостійкості. Це дозволяє зробити вивід про досить обґрунтовану доцільність широкого практичного використання автокомпенсаційних методів придушення перешкод для підвищення реальної ефективності функціонування радіолокаційних станцій, і зокрема – РСА. Можливість вживання автокомпенсаційних методів в РСА

у вигляді ААР є недостатньо вивченою. Це питання вимагає подальшого опрацювання і вивчення. У зв'язку з цим пропонується застосувати простіший метод автокомпенсації у вигляді АК. Взагалі, компенсація перешкод можлива в тому випадку, якщо вдасться організувати, окрім основного, додатковий канал, що виділяє інтенсивну перешкоду з суміші з сигналом. Прийнята по додатковому каналу перешкода віднімається з сукупності сигналу і перешкоди, що діє на вході основного каналу [4]. Для боротьби з перешкодами додатковий канал АК може бути побудований в РСА із застосуванням спеціальної компенсаційної антени у вигляді фрагмента фазованих антенних решіток.

## Висновки

Таким чином, з метою підвищення роздільної здатності РСА і поліпшення якості РЛЗ запропонований метод боротьби з різними перешкодами і тепловими шумами вживанням адаптивного компенсатора перешкод. Для коректної роботи в РСА пропонується використовувати автокомпенсатор з розширеним динамічним діапазоном і високою швидкодією.

## Список літератури

1. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов; под. ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
2. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др.; под. ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
4. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы: учеб. пособ. для вузов / В.А. Чердынцев. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 369 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Л. Баранов, ДП «Центральний НДІ навігації і управління», Київ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ПРЕПЯТСТВИЙ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ БОКОВОГО ОБЗОРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

Д.П. Пашков, С.В. Домнин

Качество формируемого радиолокационной станцией бокового обзора с синтезированием апертуры антенны (РСА) изображения (РЛИ) радиолокации во многом определяется разрешающей способностью РСА. На разрешающую способность РСА оказывает существенное влияние уровень шумов и препятствий в системе. Снижение меры их влияния является важным заданием. С этой целью предлагается употребление адаптивного компенсатора препятствий в РСА для улучшения качества получаемого РЛИ.

**Ключевые слова:** изображение радиолокации, станция радиолокации с синтезированием апертуры, шумы.

## USE OF ADAPTIVE COMPENSATE OF OBSTACLES IN THE STATIONS OF RADIO-LOCATIONS OF LATERAL REVIEW WITH SYNTHESIS OF APERTURE OF AERIAL

D.P. Pashkov, S.V. Domnin

Quality formed the station of radio-location of lateral review with the synthesis of aperture of aerial (RSA) of image (RLI) of radio-location in a great deal determined settling ability of RSA. On settling ability of RSA the level of noises and obstacles renders the substantial influencing in the system. A decline of measure of their influencing is an important task. To that end the use of adaptive compensate of obstacles is offered in RSA for the improvement of quality of got RLI.

**Keywords:** image of radio-location, station of radio-location with the synthesis of aperture, noises.