

---

УДК 621.396.62

Р.Г. Сидоренко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА СТУПЕНЮ ВПЛИВУ ПЕРЕШКОДИ НА ПРИЙМАЧ БОРТОВИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ РОЗВІДКИ І НАВЕДЕННЯ СУЧАСНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Розглянуто вплив перешкоди на приймальний тракт бортових радіотехнічних систем розвідки і наведення сучасних літальних апаратів, в результаті досліджень отримані аналітичні вирази, які дозволяють оцінити ступінь енергетичного придушення корисного сигналу перешкодою на виході функціональних елементів приймача: змішувача, підсилювача проміжної частоти, квадратичного детектора, підсилювача звукової частоти.*

**Ключеві слова:** приймач, корисний сигнал, перешкода.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах ведення бойових дій першочергова роль відводиться застосуванню бортових радіотехнічних систем розвідки і наведення сучасних літальних апаратів [1]. Одними з таких є радіометричні системи, які використовують в якості інформативного параметра радіояскраву температуру об'єктів та фонів. Однак, як показав аналіз, їх робота буде сильно порушена при впливі перешкод, що призведе до погіршення чутливості системи і зокрема її точностних характеристик.

Враховуючи важливість задачі отримання достовірної і детальної інформації о цілі, застосування бортових радіотехнічних систем розвідки і наведення сучасних літальних апаратів, в умовах активного впливу перешкод, обумовлює необхідність проведення подальших досліджень, які направлені на оцінку ступеня їх впливу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час досить докладно досліджені питання під-

вищення перешкодостійкості приймачів радіометричних систем, зокрема запропоновано велике число технічних рішень по побудові перешкодостійких бортових радіоелектронних комплексів [2, 3]. Але відомі на теперішній час методи не оцінюють, в розглянутих умовах, вплив перешкод, які генеруються сучасними радіотехнічними засобами, на характеристики роботи основних функціональних елементів тракту прийому бортових радіоелектронних систем розвідки і наведення сучасних літальних апаратів.

**Мета статті.** Оцінити ступінь енергетичного придушення корисного сигналу перешкодою на виході функціональних елементів приймача: змішувача, підсилювача проміжної частоти, квадратичного детектора, підсилювача звукової частоти.

### Основна частина

Вплив перешкоди, залежно від її інтенсивності, при проходженні прийомного тракту, буде по різному позначатися на якості функціонування приймача в цілому. Тому для оцінки ступеню впливу переш-

коди і визначення надалі можливих способів забезпечення перешкодостійкості приймача необхідно розглядати дію перешкоди в кожному функціональному елементі окремо.

У міліметровому діапазоні хвиль, незалежно від типу тракту прийому, як показує аналіз [4], його функціональна схема повинна містити: антену, змішувач з гетеродином, підсилювач проміжної частоти (ППЧ), квадратичний детектор, підсилювач звукової частоти (ПЗЧ) і інтегратор.

Аналіз впливу перешкоди на змішувач з гетеродином.

Специфічним моментом в оцінці роботи перетворювачів частоти в присутності перешкоди, для даного класу приймачів, є дія перешкоди з частотою, що не потрапляє в смугу прийому приймача, а близькій або рівній частоті гетеродина. Розглянемо цей випадок.

Як показує аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел [5], кращі шумові характеристики змішувачів в міліметровому діапазоні хвиль можуть бути досягнуті на основі їх побудови на напівпровідникових діодах з бар'єром Шоттки.

Відомо [6], що при великих рівнях вхідного сигналу вольт-амперну характеристику діода з бар'єром Шоттки (ДБШ) доцільніше представляти степенною апроксимацією замість експоненціальної. В цьому випадку можна записати

$$i(u) = I_0 u^m,$$

де  $I_0$  – крутизна характеристики, що враховує ступінь апроксимації  $m$ .

Для зручності аналізу внутрішній шум і корисний сигнал, що є випадковими шумовими процесами, обмеженими в смугі  $\Delta f$ , запишемо у вигляді узагальненого шумового сигналу з інтенсивністю  $P_{CO} = P_{ш} + P_C$  і напругою  $u_{ш}(t)$ , причому  $P_{ш} \gg P_C$ .

Тоді, в даному випадку, вхідним сигналом для ДБШ є сума напруги гетеродина, узагальненого сигналу і перешкоди, тобто:

$$u(t) = u_r(t) + u_{ш}(t) + u_n(t).$$

Вважаємо, що амплітуда перешкоди порівнянна з амплітудою сигналу гетеродина і значно більше рівня узагальненого сигналу.

Відповідно до формули бінома Ньютона, нехтуючи членами вищого порядку, запишемо:

$$i(t) = I_0 \left\{ [u_r(t) + u_n(t)]^m + m [u_r(t) + u_n(t)]^{m-1} u_{ш}(t) \right\}.$$

Припустимо, що сигналами гетеродина і перешкоди є гармонійні коливання з постійними амплітудами:  $U_r$  і  $A_n$  і частотами:  $f_r$  і  $f_n$  відповідно, а узагальнений шумовий сигнал є обмежений в смугі частот білий шум з нульовим середнім.

Тоді можемо записати:

$$\begin{aligned} u_r(t) &= U_r \cos \omega_r t; \\ u_n(t) &= A_n \cos \omega_n t; \\ u_{ш}(t) &= U_{ш}(t) \cos [\omega_0 + \varphi(t)], \end{aligned}$$

де  $U_{ш}(t)$  і  $\varphi(t)$  – випадкова амплітуда і фаза узагальненого сигналу;

$\omega_0$  – центральна частота узагальненого сигналу.

Виходячи з приведених виразів, слід зазначити, що для того, щоб на вході ППЧ з'явився сигнал (припустимо, при верхній настройці гетеродина) з частотою  $\omega_{пч} = \omega_r - \omega_0$ , величина  $m - 1$  повинна бути непарна, отже, вольт-амперна характеристика ДБШ повинна обов'язково мати непарну степінь апроксимації.

Таким чином, після перетворення і фільтрації на виході змішувача діятиме сигнал:

$$\begin{aligned} i_{пч}(t) &= I_0 U_r^m m \frac{C^2}{2^{m-3}} q_{ш}(t) B^{m-1}(q_r, \Delta\omega) \times \\ &\times \cos \left[ (\omega_r - \omega_0)t + \varphi(q_r, \Delta\omega) - \varphi(t) \right], \end{aligned}$$

де  $q_r = U_r/A_n$ , а  $\Delta\omega = \omega_r - \omega_0$ .

Звідки отримаємо відношення сигнал/шум на виході змішувача:

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{зм} = \left[ \left( \sqrt{1 + \frac{2}{q_r} \cos \Delta\omega t + \frac{1}{q_r^2}} \right)^{m-1} - 1 \right]^{-1}. \quad (1)$$

Дослідження впливу перешкоди на підсилювальний каскад.

Перешкода, що впливає на вхід радіоприймального пристрою може привести до нелінійних спотворень і навіть ввести в режим насичення підсилювальний каскад.

Припустимо, на вході каскаду, характеристика якого апроксимується поліномом  $v$ -степені

$$y = \begin{cases} \alpha x^v, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

діють узагальнений шумовий сигнал, що є стаціонарний широкосмуговий гаусів процес з нульовим математичним очікуванням і гармонійна перешкода

$$u(t) = A_n \cos(\omega_0 t + \varphi) = A_n \cos \Phi,$$

де  $\omega_0 t$  – центральна частота смуги тракту прийому.

Відомо [7], що функція кореляції шумового процесу має вид:  $R(t) = R_0(t) \cos \omega_0 t \sigma_0^2$ ; потужність рівна дисперсії  $\sigma_0^2 = \sigma_{ш}^2 + \sigma_C^2$ .

При цьому:

$$R_0(t) = \sin \frac{\Delta\omega_c \tau}{2} \Big/ \frac{\Delta\omega_0 \tau}{2}.$$

Аналіз завдання проведений за допомогою методу контурних інтегралів.

В результаті досліджень отримано відношення сигнал/шум на виході ППЧ:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{ппч}} = \frac{\frac{\alpha^2 q_{\text{вхвч}}}{2\pi}}{\frac{2\alpha^2}{\pi} + \frac{\alpha^2 q_{\text{вхвч}}}{2\pi}} \approx \frac{q_{\text{вхвч}}}{4}, \quad (2)$$

де  $q_{\text{вхвч}} = 2\sigma_0^2/A_{\text{п}}^2$ .

Аналіз впливу перешкоди на квадратичний амплітудний детектор.

Припустимо, як і раніше, що на вході детектора діє обмежений в смузі  $\Delta f_c$  узагальнений шумовий сигнал, що є сумою внутрішніх шумів і корисного сигналу приймача.

Сумарний сигнал на вході детектора може бути записаний:

$$u(t) = U_{ш} \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] + A_{\text{п}} \cos \omega_0 t = U_1(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)],$$

$$\text{де } U_1(t) = \sqrt{A_{\text{п}}^2 + U_{ш}^2 + 2U_{ш}A_{\text{п}} \cos \varphi(t)};$$

$$\varphi(t) = \arctg \frac{U_{ш} \sin \varphi(t)}{A_{\text{п}} + U_{ш} \cos \varphi(t)}.$$

У разі квадратичного детектування напругу на виході детектора (з урахуванням відфільтровування високочастотних складових інтегруючою ланкою) можна записати таким чином:

$$U_2(t) = \beta \frac{U_1^2(t)}{2} = \beta \left[ \frac{A_{\text{п}}^2}{2} + \frac{U_{ш}^2}{2} + A_{\text{п}} U_{ш} \cos \varphi(t) \right],$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує крутизну вольт-амперної характеристики діода і величину опору навантаження.

Визначимо відношення сигнал/шум на виході детектора, розуміючи в даному випадку сумарну шкідливу дію внутрішніх шумів і зовнішньої перешкоди.

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{д}} = \frac{\sigma_c^4}{A_{\text{п}}^4/8 + \sigma_{ш}^4 + 2\sigma_{ш}^2\sigma_c^2 + A_{\text{п}}^2\sigma_c^2 + A_{\text{п}}^2\sigma_{ш}^2}. \quad (3)$$

Оцінка нелінійних спотворень корисного сигналу в підсилювачі звукових частот при впливі перешкоди.

Через випадковість рівня корисного сигналу, навіть присутність детермінованої перешкоди, яка сприяє заходженню робочої точки в нелінійну область амплітудної характеристики підсилювача, викликатиме випадкові нелінійні спотворення сигналу.

Крім того, на вході ПЗЧ буде завжди присутня поволі змінна напруга, що є результатом дії флуктуацій коефіцієнта підсилення приймача, яка, складаючись з корисним сигналом, викликатиме його нелінійні спотворення.

При оцінці нелінійних властивостей, по характеристиках оператора передачі, використовуються різного роду апроксимації. Так для трактів з резистивним характером нелінійності широкого поширення набула поліноміальна апроксимація:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^i.$$

При допустимій погрішності амплітудну характеристику ПЗЧ можна представити у вигляді:

$$y = a_1 x - a_3 x^3,$$

де  $x$  – вхідна дія;  $y$  – вихідний сигнал;  $a_1, a_3$  – коефіцієнти, що характеризують лінійні і нелінійні властивості каскаду.

Вибір апроксимації поліномом третьої степені визначається мінімально необхідним для дослідження всіх основних нелінійних ефектів в прийнятно-підсилювальних трактах, пов'язаних з нелійними спотвореннями. Подібний підхід знайшов широке застосування в аналізі прийнятно-підсилювальних трактів і їх каскадів [8].

Для оцінки нелінійних спотворень сигналу в підсилювачі звукових частот, найбільш прийнятним представляється використання апарату багатовимірних частотних характеристик, що дозволяють описувати нелінійні властивості каскаду.

До достоїнств опису електричних кіл за допомогою багатовимірних частотних характеристик відносяться:

1. Явний зв'язок відгуку і дії.
2. Одночасний компактний облік інерційних і нелінійних властивостей кіл.
3. Узагальнений опис властивостей тракту, яке в окремих випадках для лінійних кіл переходить в опис за допомогою звичайного комплексного коефіцієнта передачі для резистивного кола в степеневий ряд.
4. Блокове представлення перетворення вхідної дії у вигляді суми дозволяє спростити завдання розділення нелінійних продуктів різних порядків.
5. Можливість введення добре відомого в інженерній практиці поняття передавальної характеристики кола, що зв'язує дію  $x$  і відгук  $y$  в явному вигляді.
6. Простий зв'язок вживаних на практиці нелінійних критеріїв з характеристиками коефіцієнтів передачі кола.

В результаті досліджень отримано відношення сигнал/шум на виході ПЗЧ при дії сумарного сигналу, яке матиме вигляд:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{узч}} = \frac{\sqrt{1+1/N_{\text{п}}}}{N_{\text{п}} \left( \sqrt{1+1/N_{\text{п}}} + 1 \right)^2 + 1}, \quad (4)$$

де  $N_{\text{п}}$  – коефіцієнт впливу перешкоди, який залежить від відносного параметра нелінійності каскаду, а також від потужності перешкоди.

## Висновки

Аналіз отриманих залежностей сигнал/шум на виходах функціональних елементів тракту прийому показує:

1. Відношення сигнал/шум на виході змішувача (1) різко падає при збільшенні степені апроксимації, і при  $m = 12$  (що характерний для ДБШ), навіть незначна величина перешкоди приводить до придушення узагальненого сигналу  $(P_{CO} / P_{П})_{\text{вих}} \approx 0,3$ .

Вплив перешкоди завжди приводить до енергетичних втрат сигналу, причому значне збільшення величини  $q_{\Gamma}$  веде до повільного убавання втрат. Зміна положення робочої точки ДБШ змішувача за рахунок наявності перешкоди приведе до додаткових втрат корисного сигналу.

2. При впливі зосередженої по спектру перешкоди на підсилювальний каскад, відбувається значне придушення потужності узагальненого сигналу. Відношення узагальнений сигнал/перешкода на виході погіршується в чотири рази (2) в порівнянні з вхідним, при незмінному відношенні корисного сигналу і внутрішнього шуму.

Звідси слідує практичний висновок про те, що не має сенсу добиватися розширення динамічного діапазону каскаду, а навпаки, для попередження проходження перешкоди на подальші каскади тракту приймача доцільно штучно обмежувати рівень перешкоди, для полегшення можливості її подальшої компенсації, наприклад, після ППЧ.

3. При квадратичному детектуванні має місце погіршення відношення сигнал/шум як за рахунок внутрішнього шуму, так і за рахунок впливу зовнішньої перешкоди (3).

4. збільшення рівня сигналу, а також присутність перешкоди, на вході ПЗЧ збільшують спотворення корисного сигналу на виході каскаду (4).

При відомих характеристиках нелінійності каскаду, а також при відомому, або добре прогнозо-

ваному рівні можливої перешкоди, можна задаватися оптимальним значенням середнього рівня корисного сигналу на вході каскаду.

## Список літератури

1. Куликов А. Балканская страда (1) / А. Куликов. – Воздушно-космическая оборона. – 2007. – № 2 (33). – С. 42-46.
2. Антюфеев В.И. Оптимальная и предельная структура радиометра с нестабильным коэффициентом усиления / В.И. Антюфеев, А.С. Султанов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1988. – Т. 31, № 2. – С. 142-148.
3. Антюфеев В.И. Синтез оптимального радиометра с частотной фильтрацией входного сигнала / В.И. Антюфеев, А.С. Султанов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34, № 3. – С. 247-253.
4. Автономные и комбинированные системы наведения самолетов и ракет: учеб. пос. / В.И. Меркулов, В.В. Дрогалин, А.И. Перов, А.А. Абдулов / под ред. В.И. Меркулова. Х.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 1996. – 88 с.
5. Генераторы и смесители на диодах Шоттки (по данным отечественной и зарубежной печати за 1977 – 82г.). Тематические указатели литературы. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып. 3 (336). – М.: Электроника, 1983. – 15 с.
6. Фионик В.Н., Маркова В.Н. Особенности в зависимостях параметров эквивалентной схемы диодов с барьером Шоттки от напряжения и частоты в диапазоне СВЧ / В.Н. Фионик, В.Н. Маркова – Радиотехника и электроника. – Т. XXVI, вып. 2. – М.: Наука, 1981.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн.первая. – 2-е изд., перераб. и доп. / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.
8. Бедросян, Райс. Свойства выходного сигнала систем, описываемых рядами Вольтерра, при подаче на вход гармонических колебаний и гауссова шума / Бедросян, Райс // ТИИЭР. – 1971. – № 12. – С. 58-82.

Надійшла до редколегії 12.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.М. Сотніков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХИ НА ПРИЕМНИК БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗВЕДКИ И НАВЕДЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р.Г. Сидоренко

*Рассмотрено воздействие помехи на приемный тракт бортовых радиотехнических систем разведки и наведения современных летательных аппаратов, в результате исследований получены аналитические выражения, позволяющие оценить степень энергетического подавления полезного сигнала помехой на выходе функциональных элементов приемника: смесителя, усилителя промежуточной частоты, квадратичного детектора, усилителя звуковой частоты*

**Ключевые слова:** приемник, полезный сигнал, помеха

## ESTIMATION OF LEVEL INFLUENCE HINDRANCE ON RECEIVER OF BORDER RADIOTECHNICAL SYSTEMS OF EXPLORATION AND AIMING THE MODERN FLYING MACHINES

R.G. Sydorenko

*Considered influence of the hindrance on receiving tract of border radiotechnical systems of exploration and aiming the modern flying machines, as a result of research are received analytical expressions, that allowing value degree of the energy suppression of the useful signal by hindrance on exit functional elements receiver: mixer, intermediate frequency amplifier, quadratic detector, sound frequency amplifier*

**Keywords:** receiver, useful signal, hindrance.