

ВПЛИВ ПРОПЕЛЕРНОЇ МОДУЛЯЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОСТОРОВОЇ РЕЖЕКЦІЇ ЗАВАД АДАПТИВНИМИ АНТЕНАМИ БОРТОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

к.т.н. Б.Б. Поспелов
(подав д.т.н., проф. П.Ю. Костенко)

Розглянуто проблему впливу пропелерної модуляції на ефективність просторової режекції завад адаптивними антенами бортових систем зв'язку.

Вступ. У сучасних операціях для забезпечення управління військами застосовується цілий комплекс різноманітних засобів радіозв'язку. Слід відмітити, що для деяких систем зв'язку, наприклад ВПС, радіозв'язок є і залишається найважливішим, а у низці випадків і єдиним засобом управління авіацією. Радіозв'язок у ВПС організується у радіомережах та радіонапрямах. Важливе місце при цьому відводиться наземному і повітряному радіозв'язку у діапазоні 100 – 150 і 220 – 399 МГц для забезпечення наземних пунктів управління та екіпажів гелікоптерів і літаків засекречуваним або незасекречуваним радіозв'язком, як правило, у телефонному режимі, а також обміну формалізованими повідомленнями та передачі на борт команд наведення у режимі автоматизованої радіолінії. На даний час основними типами авіаційних засобів радіозв'язку у розглядуваному діапазоні хвиль є радіостанції Р – 832 М, Р – 862, Р – 863, що забезпечують телефонний радіозв'язок і передачу даних у комплексі з апаратурою швидкодії. Оскільки діапазон 100 – 150 МГц практично не використовується для управління військовою авіацією в країнах дальнього зарубіжжя, саме у цьому діапазоні слід очікувати масове застосування передавачів загороджувальних та індивідуальних завад для авіаційних радіоліній в тактичній ланці управління.

У цих умовах існуючі засоби радіозв'язку не здатні забезпечити необхідного рівня гарантованої пропускнуої спроможності радіоліній. Тому проблема захисту від завад авіаційних радіоліній управління залишається до кінця не вирішеною. Дана проблема тісно пов'язана з важливішою науковою та технічною задачею, щодо модернізації і розвитку бортових засобів зв'язку ВПС.

Аналіз літератури. На даний час важливе місце у рішенні проблеми захисту різноманітних спеціальних радіосистем від завад відводиться впро-

вадженню засобів адаптивної просторової обробки сигналів. Реалізація означених засобів припускає заміну традиційних антен у радіосистемах на адаптивні антени [1, 2]. Такі антени здатні здійснювати адаптивну просторову режекцію завад і завдяки цьому підвищувати відношення сигнал/завада на вході приймальних приладів. При захисті бортових засобів і комплексів зв'язку бойових літаків і гелікоптерів, а також повітряних пунктів управління від завад необхідно розміщувати адаптивні антени на літаках і гелікоптерах. Ефективність просторової режекції завад у цьому випадку залежить від багатьох чинників. Наприклад, екрануючи елементи конструкції деяких типів літаків та гелікоптерів, які обертаються, викликають так звану пропелерну або роторну модуляцію сигналів і завад, які приймаються, тобто появу періодичних фазових (частотних) та амплітудних викривлень [3, 4]. Оскільки адаптивні антени є саморегулюючими щодо завад системами, дослідження впливу пропелерної модуляції на ефективність антенних систем такого типу представляє практичний інтерес. Відомі результати [5, 6] присвячені в основному дослідженню періодичної амплітудної модуляції завад. У меншому ступені досліджений вплив фазового викривлення завад [7, 8]. При цьому дослідження впливу пропелерної модуляції на ефективність адаптивних антен у відомій літературі відсутні.

Ціль статті. Дослідження впливу фазового викривлення завад, зумовленого пропелерною модуляцією, на ефективність просторової режекції завад в адаптивних антенах бортових засобів зв'язку.

Будемо вважати, що адаптивні антени бортових засобів і комплексів зв'язку бойових літаків і гелікоптерів реалізують алгоритм мінімуму середнього квадрату відхилення вихідного сигналу від опорного. Припустимо, що опорний сигнал визначається функцією часу $r(t) = A_r e^{j(\omega_0 t + \varphi_r)}$, де A_r , ω_0 , φ_r – амплітуда, частота та початкова фаза опорного сигналу. Тоді процес адаптації вагового вектора $W(t')$ такої адаптивної антени за наявності фазових викривлень завад, обумовлених пропелерною модуляцією, може бути описаний диференціальним рівнянням зі змінними параметрами:

$$\frac{dW(t')}{dt'} + \left[R_0 + \xi_M \sum_{p=0}^{n-1} \sum_{q=0}^{n-1} e^{j\chi_{pq}(t')} V_p^* V_q^T \right] W(t') = \frac{A_r}{\sigma_n} \sqrt{\xi_s U_s^*}, \quad (1)$$

де $t' = k' \sigma_n^2 t$ – нормований час; k' – коефіцієнт підсилення у контурі адаптації адаптивної антени; $R_0 = I + \xi_s U_s^* U_s^T$; $\xi_M = \frac{A_M^2}{\sigma_n^2}$ і $\xi_s = \frac{A_s^2}{\sigma_n^2}$ – відношення квадратів амплітуд завади та корисного сигналу до дисперсії

шумів на вході антени відповідно; $U_s = [1, e^{j\varphi_s}, \dots, e^{-j(n-1)\varphi_s}]^T$ – вектор фазових зрушень корисного сигналу на виході антенних елементів адаптивної антени; $\varphi_s = \pi \sin \Theta_s$, де Θ_s – напрямок приходу корисного сигналу відносно нормалі до розкриву антени; $V_p = [0, 0, \dots, e^{-jp\varphi_M}, 0, 0]^T$; $\chi_{pq}(t') = \gamma_M(t' - qT_M) - \gamma_M(t' - pT_M)$, де $0 < p, q \leq (n-1)$, а $\gamma_M(t')$ – довільна функція, яка описує фазові викривлення завади, обумовлені пропелерною модуляцією, на виході антенного елемента, прийнятого за початок відлічування; $T_M = \frac{\pi}{\omega_0} \sin \Theta_M$ – час затримки завади на виході сусідніх антенних елементів (припускається однаковий для всіх антенних елементів), де Θ_M – напрямок прийому завади відносно оптичної осі адаптивної антени.

За наявності пропелерної модуляції функція $\gamma_M(t')$, що описує фазові викривлення завади, є періодичною функцією, параметри якої, наприклад для гелікоптерів, визначаються швидкістю обертання та числом лопотей несучого або хвостового гвинтів. Враховуючи це, для рішення (1) скористуємось поданням

$$W(t') = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_h e^{jh\omega'_m t'}, \quad (2)$$

де C_h – вектор коефіцієнтів Фур'є; $\omega'_m = \frac{\omega_m}{k' \sigma_n}$ – основна нормована частота у спектрі функції $\gamma_M(t')$. Слідуючи методиці [7] і враховуючи [6],

при $A_r/\sigma_n = 1$ для вектора C_h буде справедливо рівняння

$$(R_0 + jh\omega'_m I)C_h + \sum_{\ell=-L}^L \sum_{p=0}^{n-1} \sum_{q=0}^{n-1} f_{\ell pq} V_p^* V_q^T C_{h-1} = \sqrt{\xi_s} U_s^* \delta_{h0}, \quad (3)$$

де $f_{\ell pq}$ – ℓ -й коефіцієнт Фур'є функції $\xi_M \exp\{j\chi_{pq}(t')\}$; $-\infty < h < \infty$. З урахуванням кінцевого числа компонентів у (2), вектор

$$C_h = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_{hk} V_k^*, \quad (4)$$

де α_{hk} – коефіцієнт, який визначається проекцією вектора C_h на одиничний вектор V_k^* . Підставивши (4) у (3) та помножуючи зліва на вектор V_a , де $a = 0, \dots, (n-1)$ при $0 \leq a \leq n-1$, будемо мати, що

$$jh\omega'_m \alpha_{ha} + \sum_{k=0}^{n-1} Q_{ak} \alpha_{hk} + \sum_{\ell=-L}^L \sum_{q=0}^{n-1} f_{\ell aq} \alpha_{(h-\ell)q} = \sqrt{\xi_s} (V_a^T V_s^*) \delta_{h0}, \quad (5)$$

де $Q_{ak} = V_a^T R_0 V_k^* = \delta_{ak} + \xi_s e^{f[(a-k)(\phi_s - \phi_M)]}$, а $V_a^T U_s^* = e^{f[a(\phi_s - \phi_M)]}$.

Для даного співвідношення справедливе подання його у вигляді матричного рівняння вигляду

$$MA = B,$$

де M – матриця коефіцієнтів, які визначаються лівою частиною (5); $A = [\alpha_{h0}, \alpha_{h1}, \dots, \alpha_{hk}; \alpha_{(h-1)1}, \dots, \alpha_{(h-1)k}; \alpha_{(-h)1}, \dots, \alpha_{(-h)k}]^T$ – вектор коефіцієнтів α_{hk} ; B – вектор, який визначається правою частиною (5). Рішення даного рівняння дозволяє знайти невідомий вектор A , а з його допомогою і вектор C_h , який визначає вектор обурених вагових коефіцієнтів $W(t')$. Слід відмітити, що обурений вектор $W(t')$ в загальному випадку викликає відповідні зміни амплітудної та фазової характеристик корисного сигналу на виході адаптивної антени. Вихідний корисний сигнал у цьому випадку буде визначатися співвідношенням

$$\tilde{x}_s(t') = A_s W^T(t') U_s \exp \{j(\omega'_0 t' + \Psi_s)\}, \quad (6)$$

де A_s – амплітуда корисного сигналу на вході антени; Ψ_s – випадкова початкова фаза з рівномірним законом розподілу значень в інтервалі $[0, 2\pi]$. Амплітуду $A_s W^T(t') U_s$ в (6) представимо у вигляді добутку двох функцій $\alpha_s(t')$ та $e^{j\eta_s(t')}$, які характеризують амплітудні та фазові викривлення корисного сигналу на виході антени. Щодо кількісної оцінки впливу амплітудних викривлень введемо параметр ρ , який визначається відношенням різниці максимального та мінімального значень функції $\alpha_s(t')$ на протязі періоду викривлень до максимального значення цієї функції. Залежність параметра ρ від частоти пропелерної модуляції при різних значеннях девіації фазових викривлень зображена на рис. 1.

З аналізу кривих на рис. 1 видно, що пропелерна модуляція призводить до викривлення амплітуди вихідного сигналу адаптивної антени. Такі викривлення будуть впливати на середнє значення вихідного відношення потужностей корисного сигналу і завад і, як наслідок, на помилку у прийомі інформації. З урахуванням (6) для відношень потужності завади до потужності шумів $\frac{q_M}{III}$ і потужності корисного сигналу до сумарної потужності завади і шумів $\frac{q_C}{M+III}$ (t') на виході адаптивної ан-

тени справедливі відповідні співвідношення:

$$q_{\frac{M}{III}}(t') = \frac{P_M(t')}{P_n(t')} ; q_{\frac{C}{M+III}}(t') = \frac{P_s(t')}{P_M(t') + P_n(t')}$$

де $P_s(t') = 0,5M \left\{ \tilde{x}_s(t') \right\}^2$, $P_M(t') = 0,5A_M^2 \left| W^T(t') U_M(t') \right|^2$,

$P_n(t') = 0,5\sigma^2 W^T(t') W^*(t')$ – потужності корисного сигналу $\tilde{x}_s(t')$, завади і шумів на виході адаптивної антени.

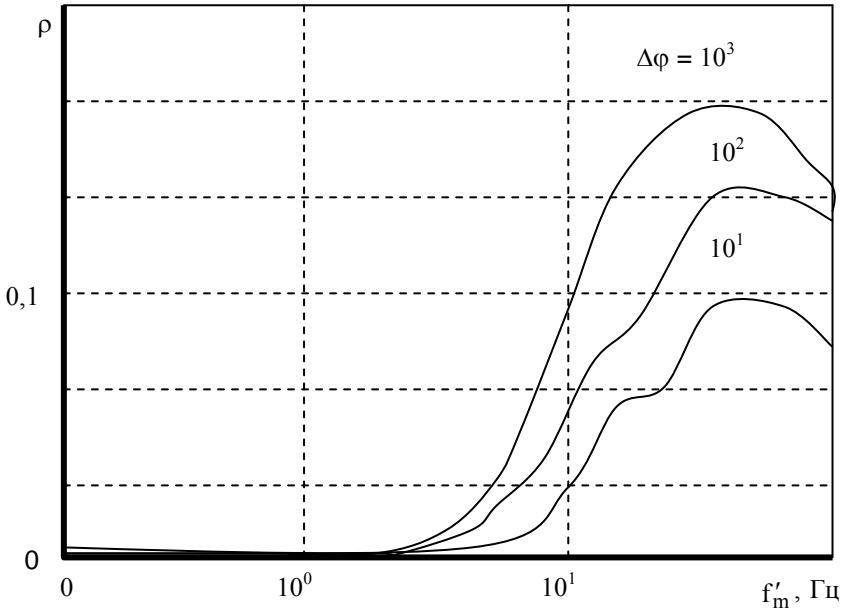


Рис. 1. Залежність параметра викривлення амплітуди корисного сигналу від частоти пропелерної модуляції

З урахуванням наведених вище співвідношень досліджувалася ефективність режекції завад в двохелементній адаптивній антені за наявності пропелерної модуляції, що викликає фазові викривлення завади, які описуються функцією $\gamma_M(t') = \Delta\varphi \sin(\omega'_m t')$, де $\Delta\varphi$, ω'_m – девіація та частота фазових викривлень. Результати виконаних досліджень свідчать про те, що пропелерна модуляція здійснює вплив на вихідний сигнал при значеннях девіації фази $\Delta\varphi \geq 10^1$. При подальшому збільшенні девіації значення $q_{\frac{M}{III}}$ може зростати до величини понад 20 dB і більш і, як наслідок, призводити до

зниження $q \frac{c}{M+3}$. Вплив частоти фазових викривлень завади на рівень корисного сигналу носить резонансний характер і пояснюється інерційними властивостями адаптивної антени. Для антени, яка досліджувалась, найбільший вплив має місце у діапазоні частот $10^1 - 10^2$ Гц. Однак зі збільшенням ξ_s (при фіксованому відношенні ξ_M) вплив викривлень на рівень вихідного сигналу знижується. Так, наприклад, збільшення ξ_s з 10 до 40 dB при $\xi_M = 30$ dB призводить до зниження впливу на 15%.

Для оцінки ефективності просторової режекції завади в двохелементній адаптивній антені досліджувалась залежність середньої імовірності помилки $\bar{P}_{ОШ}$ в прийомі інформаційного символу в радіолінії від параметрів пропелерної модуляції. На рис. 2 показана характерна залежність середньої імовірності помилки $\bar{P}_{ОШ}$ в прийомі інформаційного символу в радіолінії від частоти пропелерної модуляції для різних значень потужності завади.

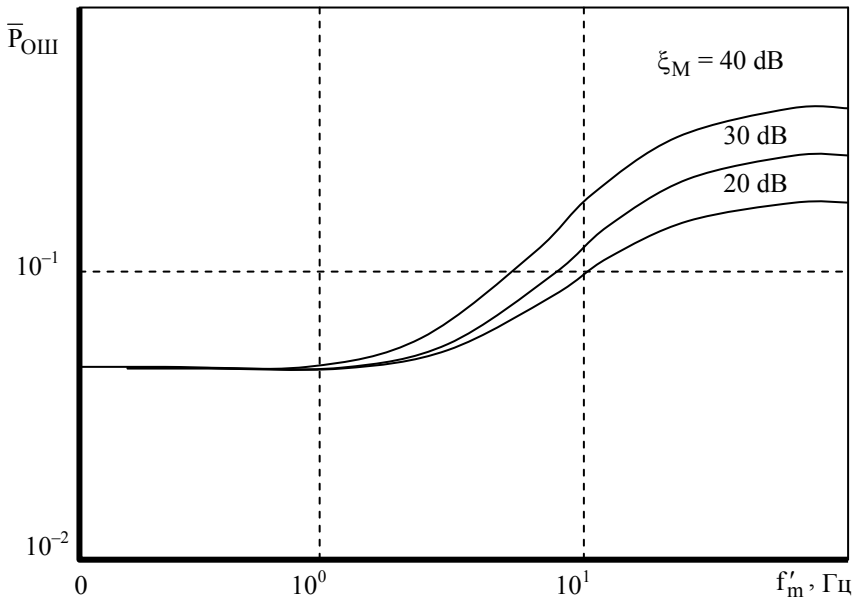


Рис. 2. Залежність середньої імовірності помилки в прийомі інформаційного символу в радіолінії від частоти модуляції у різних завадовій обстановці

Встановлено, що при збільшенні частоти пропелерної модуляції завади понад 10 Гц, середня імовірність помилки в прийомі символу зростає на порядок. При цьому аналогічне збільшення середньої імовірності

помилки має місце і при збільшенні девіації фази понад 10^2 або відношення ξ_M понад 20 dB.

Висновки. Таким чином, пропелерна модуляція завад в цілому викликає зниження ефективності просторової режекції завад на виході адаптивних антен. Основною причиною зниження ефективності є поява амплітудних викривлень у вихідному корисному сигналі антени. Це призводить до зростання середньої імовірності помилки при передачі інформації по радіолінії в цілому. Встановлено, що пропелерна модуляція виявляється сильніше при малих наріжних відстанях між напрямками прийому завади і корисного сигналу, великих значеннях девіації фази і високій частоті фазових викривлень, потужних завадах та слабких корисних сигналах. Ці особливості треба враховувати в разі необхідності використання адаптивних антен для забезпечення захисту від навмисних завад засобів радіозв'язку на об'єктах авіаційної техніки. Подальший розвиток у цьому напрямку слід зосередити на дослідженні впливу пропелерної модуляції на фазові викривлення корисного сигналу. Ця проблема дуже важлива щодо впровадження адаптивних антен в авіаційні канали зв'язку з фазовою або частотною модуляцією корисних сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.*
2. *Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А.К. Журавлёв, В.А. Хлебников, А.П. Родимов и др. – Л.: ЛГУ, 1991. – 544 с.*
3. *Шатраков Ю.Г. и др. Самолетные антенные системы / Ю.Г. Шатраков, М.И. Ривкин, Б.Г. Цыбаев. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.*
4. *Красюк В.Н. Электромагнитные волны в средах с пространственно-временными изменениями параметров. – Л.: ЛГУ, 1984. – 216 с.*
5. *Compton R.T. The effect of a pulsed interference signal on adaptive array // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. AES-18 (May 1982). – 297 с.*
6. *Ruwais A.S., Compton R.T. Adaptive array behavior with periodic envelope modulated interference // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. AES-21 (Nov. 5, 1985). – 757 с.*
7. *Ruwais A.S., Compton R.T. Adaptive array behavior with periodic phase modulated interference // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – AES-23 (Nov. 5, 1987). – P. 602 – 611.*
8. *Солодовников В.В., Дмитриев А.Н., Егунов Н.Д. Спектральные методы расчета и проектирования систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 440 с.*

Надійшла 20.04.2004

ПОСПЕЛОВ Борис Борисович, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри XI ВПС. У

1971 році закінчив Київське ВВАГУ. Область наукових інтересів – заводостійкість та заводозахищеність авіаційних радіоліній.