

УДК 621.396:681.34

Б.Б. Поспелов¹, О.В. Тоцький²¹Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ²Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського "ХАІ", Харків

ТЕХНОЛОГІЯ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ НА ОСНОВІ КЕРОВАНИХ ДИНАМІЧНИХ РАДІОКАНАЛІВ

Дано теоретичне узагальнення і запропоновано нове рішення проблеми ефективного радіозв'язку з БПЛА на основі керованих динамічних радіоканалів з адаптивним узгодженням характеристик спрямованості на передавальній і приймальній сторонах.

Ключові слова: радіозв'язок, радіоканал, керований динамічний радіоканал, адаптація.

Вступ

Постановка проблеми. Нині безпілотні літальні апарати (БПЛА) отримали широке застосування в арміях НАТО для вирішення різного спектру завдань, пов'язаних з підвищенням здатності до взаємодії між системами контролю і управління на основі обміну цифровими мультимедійними даними, що у тому числі формуються на борту БПЛА [1]. Успіх застосування безпілотних апаратів, особливо БПЛА розвідки і спостереження, залежить від наявності перспективних засобів радіозв'язку і передачі даних, які є критичними елементами успішного застосування безпілотних і роботизованих засобів. При цьому інформаційний потік досягає вже таких об'ємів, що існуючі системи передачі даних (СПД) не завжди дозволяють своєчасно доводити відомості до споживачів. Можливості існуючих СПД за швидкістю передачі інформації обмежуються частотним ресурсом і вимогами по мінімізації розмірів і ваги бортової апаратури для БПЛА. На думку американських експертів, підвищення швидкості передачі до 10 Гбіт/с (у десятки разів вище нині існуючої) можливо забезпечити за рахунок застосування сучасних інформаційно-емких методів модуляції сигналів. Реалізація останніх вимагає "дуже хороших" радіоканалів. Проте реальні умови радіозв'язку з БПЛА ускладнюються зниженням енергетичного ресурсу бортового устаткування, наявністю інтерференції, обумовленої складною геометрією БПЛА, істотним зростанням рівня і числа джерел сигналів, що заважають, і завад, а також значною нестационарною просторового положення і орієнтації БПЛА відносно напрямку зв'язку.

Перераховані чинники призводять до істотного зниження якості радіоканалів. Тому необхідність забезпечення зростаючих вимог до швидкості передачі даних і істотне ускладнення умов радіозв'язку при обмеженому частотному ресурсі породжують проблему підвищення питомої пропускної спроможності радіоканалів (спектральній ефективності) зв'язку з БПЛА.

Аналіз останніх публікацій. Основні вимоги за швидкістю передачі даних від бортових сенсорів БПЛА сформульовані в стандарті НАТО STANAG 4609 [2]. Характерною рисою стандарту STANAG 4609 є орієнтація на використання комерційних цифрових технологій і устаткування передачі даних з урахуванням специфічних умов військового застосування. Формат передачі даних, що передаються з борту БПЛА, регламентується стандартом STANAG 7023 і керівництвом AEDP - 9, в яких визначені основні технології формування цифрових потоків даних і супроводжуючої інформації від різних бортових датчиків [3]. Вимоги до радіоліній зв'язку БПЛА, сумісних з тактичними засобами, викладені в закритому стандарті STANAG 7085 [4]. Інший стандарт, STANAG 4660, регламентує основні вимоги для високозахищеного каналу обміну даними для БПЛА. При цьому основною проблемою у вказаних стандартах є доступність частотного ресурсу. Ситуація ускладнюється очікуваним найближчими роками прийняттям на озброєння великого числа нових типів БПЛА, обладнаних датчиками з високою роздільною здатністю. За останнє десятиліття комерційний радіозв'язок зазнав істотні зміни. Ці зміни торкнулися технологій самого радіозв'язку і її застосувань. Радіозв'язок поповнився складними технологіями доступу, кодування, у тому числі просторово-часового, модуляції, адаптації, МІМО і іншими [5 – 8]. Проте рівень реальної пропускної спроможності радіоканалів, що надається, виявляється недостатнім для їх використання в задачах організації зв'язку з БПЛА [1 – 4]. Тому стосовно БПЛА відомі технології радіозв'язку вимагають відповідного розвитку.

Формулювання мети статті. Основним обмеженням на шляху успішного рішення цієї проблеми є деяка зневага у відомих технологіях радіозв'язку системними принципами і "мовчазна" згода при їх розробці з фактом використання "поганого" радіоканалу. Така згода спричиняє за собою використання складних технологій передачі, що базуються зазвичай на введенні істотної надмірності в інформаційні дані, а також розширенні необхідного частот-

ного ресурсу, що, кінець кінцем, призводить до зниження питомої інформаційної пропускної спроможності СПД.

При цьому потенційні можливості радіозв'язку, наслідуючи відомий системний принцип, істотно залежать від пропускної спроможності $C(F(\bullet))$ використовуваного в СПД безперервного каналу зв'язку (радіоканалу).

У загальному випадку довільний радіоканал може бути описаний деяким оператором $F(\bullet)$. Якщо скористатися поняттям ε -продуктивності R_ε для джерела даних на вході такого радіоканалу, то потенційні можливості по збільшенню швидкості передачі визначатимуться з відомої нерівності К. Шеннона [9]:

$$R_\varepsilon \leq C(F(\bullet)), \quad (1)$$

де $F(j_\beta(t), e(t), t)$ – оператор радіоканалу, який в загальному випадку зв'язку з БПЛА залежить від зовнішніх перешкод $j_\beta(t)$, обурень $e(t)$ і поточного часу. Слід зауважити, що існуючі технології радіозв'язку зазвичай вважають оператор $F(\bullet)$ заданим і некерованим, що істотно, на наш погляд, обмежує системні можливості по збільшенню швидкості передачі.

Традиційні технології радіозв'язку нині вже реалізують граничні швидкості передачі, що обмежуються зазвичай складністю пристроїв частотно-часової обробки на передавальній і приймальній сторонах [5 – 8]. Тому для вирішення проблеми пропонується використовувати інший підхід, який базується на припущенні керованого радіоканалу (оператора $F(\bullet)$) за умови заданих пристроїв частотно-тимчасової обробки даних на передавальній і приймальній сторонах [10]. Такий підхід є основою для розвитку нової технології інтелектуальних динамічних радіоканалів, здатних самостійно влаштуватися під конкретні умови передачі, забезпечуючи при цьому екстремальну питому пропускну спроможність радіоканалу.

Метою статті є розвиток нової технології радіозв'язку з БПЛА в складних умовах на основі керованих динамічних радіоканалів.

Виклад основного матеріалу

Грунтуючись на сучасних принципах управління, оператор $F(\bullet)$ представимо у вигляді композиції операторів:

$$F(\bullet) = F_{UR}(e_R) \circ F_M(j_\beta, e_M) \circ F_{UT}(e_T)$$

Тут оператори $F_{UT}(e_T)$ і $F_{UR}(e_R)$ описують процеси в керованих пристроях просторово-часового формування і випромінювання, а також прийому і обробки на передавальній і приймальній сторонах з урахуванням діючих обурень e_T і e_R .

При цьому оператор $F_M(j_\beta, e_M)$ описує перетворення просторово-часових сигналів в середовищі передачі з урахуванням дії зовнішніх завад і обурень e_M в середовищі [11 – 13].

Тоді для даного керованого радіоканалу при передачі довільного сигналу x_λ і що приймається y_λ справедливо операторна форма рівняння

$$y_\lambda = F_{UR}(e_R) \circ F_M(j_\beta, e_M) \circ F_{UT}(e_T) \{x_\lambda\}, \quad (2)$$

де $\alpha = (F_{UT}, F_{UR})$, $\alpha \in \Omega_\alpha^d$ визначає клас допустимих керованих радіоканалів, а $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, e_T, e_M, e_R, F_M)$, $\gamma \in \Omega_\gamma^d$ – клас допустимих ситуацій (умов) радіозв'язку з БПЛА. Вводячи агрегований клас $s_d = (\alpha, \gamma)$, $s_d \in \Omega_S^d$ допустимих радіоканалів і ситуацій, а також визначаючи показники якості для допустимого класу керованих радіоканалів у вигляді функціоналів

$$\Phi(x_\lambda, y_\lambda, U_T, U_R) \rightarrow \frac{\text{extr}}{U_T \in \Omega_T, U_R \in \Omega_R},$$

або $\Phi(x_\lambda, y_\lambda, U_T, U_R) \geq C_0$. (3)

можна сформулювати оптимізаційне завдання для керованих радіоканалів в наступному виді [14, 15]: визначити з допустимого класу Ω_α^d такого керованого радіоканалу α , який для класу Ω_γ^d допустимих ситуацій і цілей (3) був оптимальним в агрегованому класі Ω_S^d .

Нехай ситуація радіозв'язку характеризується відповідними імовірнісними мірами в просторі реалізації для даних компонентів $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, e_T, e_M, e_R, F_M)$. Тоді рівнянню (2) може бути поставлена у відповідність імовірнісна модель керованого радіоканалу у виді:

$$[P_\alpha^\gamma(dx_\lambda/y_\lambda), P(dx_\lambda)].$$

Оскільки міра $P(dx_\lambda)$ не є невід'ємною характеристикою керованого радіоканалу, її можна виключити з розгляду і враховувати у вигляді обмеження, наприклад, загального вигляду:

$$\eta_1 \leq \sum_{dx_\lambda} \eta(dx_\lambda) P(dx_\lambda) \leq \eta_2.$$

Для цієї імовірнісної моделі в якості (3) можна використовувати поточну пропускну спроможність, визначувану

$$C_t^{\alpha\gamma} [P_\alpha^\gamma(dx_\lambda/y_\lambda), \eta(dx_\lambda)] = \Delta f \sup_{P(dx_\lambda) \in \Omega_x^P} I_{XY}^{\alpha\gamma},$$

де $I_{XY}^{\alpha\gamma}$ – інформація зв'язку процесів на вході і виході керованого радіоканалу $\alpha = (F_{UT}, F_{UR})$ в ситуації $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, e_T, e_M, e_R, F_M)$. З урахуванням цих

представлень умову К. Шеннона (1) можна представити у виді:

$$R_\epsilon = C_t^{\alpha\gamma} \text{ або } \ln(1 + \epsilon^{-2}) = C_t^{\alpha\gamma} / \Delta f. \quad (4)$$

Із співвідношень (4) виходить, що застосування керованих радіоканалів і їх оптимізація при зв'язку з БПЛА є основою для реалізації потенційних показників швидкості і точності передачі даних в різних ситуаціях $\gamma = (x_\lambda, j_\beta, e_T, e_M, e_R, F_M)$. Проте в реальних умовах оптимізація поточної пропускної спроможності

$$C_t^{\alpha(t)\gamma(t)}(U) = M \left\{ I_{\alpha(t)}^{\gamma(t)}(x_\lambda, y_\lambda(U)) \right\},$$

де $U = (U_T^T, U_R^T)^T$ – вектор агрегованого управління, істотно утруднюється через відсутність апріорних відомостей про імовірнісну міру $P_{\alpha(t)}^{\gamma(t)}(dx_\lambda, dy_\lambda(U))$ і функціонал $I_{\alpha(t)}^{\gamma(t)}(x_\lambda, y_\lambda(U))$ умовної інформації.

Відомі підходи, що засновані на формуванні оцінок вказаних мір і функціоналів виявляються досить складними, вимагають великих часових витрат, що не дозволяють використовувати їх в нестаціонарних умовах зв'язку з БПЛА. Тому пропонується скористатися адаптивним підходом, основною рисою якого є накопичення поточної інформації, що знаходиться в спостереженнях, і негайне її використання для усунення невизначеності з метою оптимізації заданого показника якості [16].

Можна показати, що максимум $C_t^{\alpha(t)\gamma(t)}(U)$ при унімодальних мірах $P_{\alpha(t)}^{\gamma(t)}(dx_\lambda, dy_\lambda(U))$ еквівалентний мінімуму середнього квадрата нев'язки $\epsilon_U = y_\lambda(U, \alpha(t), \gamma(t)) - x_\lambda^0$, який крім усього іншого визначає оптимальне агреговане управління серед усіх можливих у класі керованих гауссівських радіоканалів.

Зручною базовою платформою для реалізації пропонувананих керованих радіоканалів служать багатантенні технології формування, випромінювання, прийому і обробки просторово-часових сигналів, які використовуються у відомих технологіях МІМО [5 – 8].

Технологія адаптації керованих радіоканалів. Реальна ситуація, що виникає в задачах зв'язку з БПЛА, характеризується зазвичай відсутністю апріорних відомостей про статистику сигналів, що передаються, діючих радіоперешкод і шумів в середовищі передачі, а також напрямках випромінювання і прийому сигналів і перешкод. Окрім цього зазвичай відсутня також інформація про структуру фідерного тракту, що використовується, та векторні характеристики спрямованості антен з урахуванням їх бортового базування на БПЛА.

Отже, реальні ситуаційні умови радіозв'язку з БПЛА характеризуються істотною невизначеністю і,

крім того, можуть значно змінюватися в процесі зв'язку. У цих умовах спостережуваний на виході керованого радіоканалу сигнал $y_\lambda = V(U, x_\lambda)$ визначається оператором $V(U, x_\lambda)$, який в явній формі не визначений.

Вибираючи в якості показника якості керованого радіоканалу середній квадрат нев'язки

$$\epsilon_U = y_\lambda(U, \alpha(t), \gamma(t)) - x_\lambda^0,$$

де замість сигналу x_λ^0 використовується відповідний пілот-сигнал s_0 з відомими характеристиками, процедура покрокової адаптації агрегованого управління визначатиметься співвідношенням:

$$U(k+1) = U(k) - 2\mu_k \nabla_U V(k)(y_\lambda(k) - s_0(k)), \quad (5)$$

де $\nabla_U V(k) = \left[\frac{dy_\lambda}{du_T^1}, \dots, \frac{dy_\lambda}{du_T^n}, \frac{dy_\lambda}{du_R^1}, \dots, \frac{dy_\lambda}{du_R^k} \right]^T$ – вектор,

що характеризує "чутливість" даного керованого радіоканалу (у разі невизначеного оператора $V(k)$) до зміни відповідних складових агрегованого управління на k -му кроці адаптації.

Відповідно до (5) можна представити процедури адаптації управління для передавальної і приймальної сторін радіоканалу відповідно у виді:

$$U_T(k+1) = U_T(k) - 2\mu_k \nabla_{U_T} V(k)[y_\lambda(k) - s_0(k)]; \quad (6)$$

$$U_R(k+1) = U_R(k) - 2\mu'_k \nabla_{U_R} V(k)[y_\lambda(k) - s_0(k)]. \quad (7)$$

Варіанти можливих структур адаптивних керованих радіоканалів для зв'язку з БПЛА, що реалізують процедури (6) і (7) з використанням систем адаптивного настроювання (САН), приведені на рис. 1.

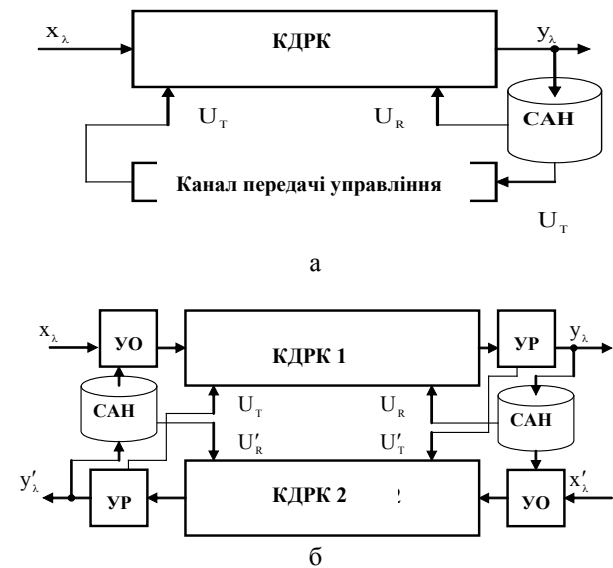


Рис. 1. Структури адаптивних КДРК для БПЛА: а – односторонній КДРК з каналом передачі управління; б – двосторонній КДРЛ

При двобічному інформаційному обміні керування передавальним трактом просторово-часової обробки передаються по відповідних каналах керування або спільно з інформаційними сигналами, або в спеціальні інтервали часу по основних каналах передачі даних.

В загальному випадку необхідно мати два незалежних однобічних керованих динамічних радіоканалів (КДРК), що функціонують, наприклад, на різних частотах. В окремому випадку можливо застосування одного однобічного КДРК з регламентуванням режимів напрямків інформаційному обміну.

Верифікація запропонованої технології і процедур адаптації. Верифікація проводилася на безлічі типових тестових ситуацій радіозв'язку з БПЛА для різних рівнів невизначеності, в яких оцінювалися динамічні характеристики і питома пропускна спроможність, що реалізовувалася, у разі узгодженої адаптації радіоканалу і адаптації радіоканалу тільки на приймальній стороні.

В якості ілюстрації на рис. 2. приведені результати, що характеризують динаміку адаптації спрямованих властивостей передавальної і приймальної антенних систем, що мають мінімальну вимірність, до умов тестової ситуації.

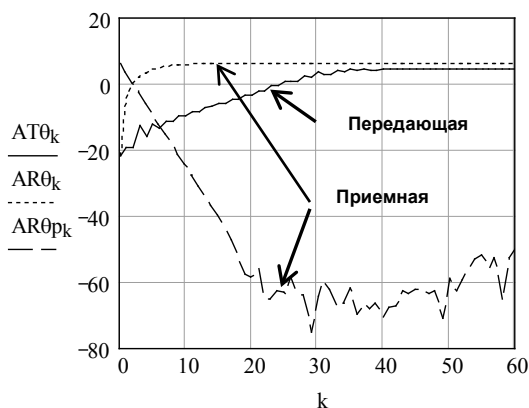


Рис. 2. Динаміка характеристик антенних систем

Антенні системи мінімальної вимірності, що досліджувались, склалися з двох антен з довільними характеристиками спрямованості і розташуванням на обох об'єктах. Тестова ситуація визначалась ситуаційною невизначеністю напрямку радіозв'язку в умовах дії невідомого потужного джерела завади, що перевищував рівень сигналу в області прийому на 40 дБ.

Ілюстрація динаміка питомої пропускної спроможності для адаптивного керованого радіоканалу в цій ситуації представлена на рис. 3. Безперервна крива відповідає узгодженій адаптації управлінні на передавальній і приймальній сторонах, а пунктирна – тільки на приймальній стороні.

Для даних, що наведені на рис. 3, в смузі частот, наприклад, яка дорівнює 20 МГц (така смуга використовується у відомих технологіях стандартів

802.X), можлива швидкість передачі при використанні запропонованого керованого радіоканалу складає величину близько 160 Мбіт/с (при узгодженій адаптації) і близько 4 Мбіт/с (при адаптації тільки на приймальній стороні). При цьому швидкість передачі для аналогічної конфігурації МІМО (2x2) з використанням відомих технологій в цих умовах прагне в межах до нуля.

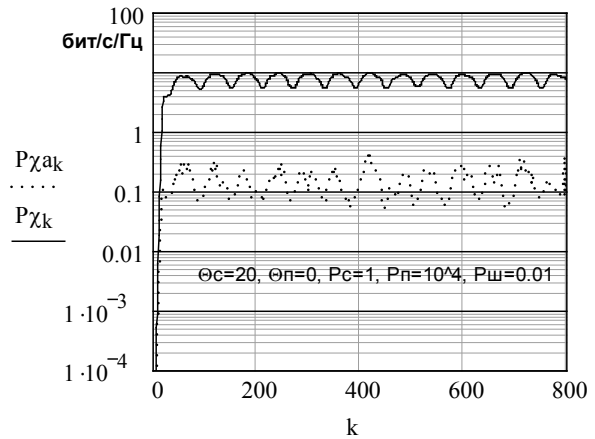


Рис. 3. Динаміка питомої пропускної спроможності для адаптивного керованого радіоканалу

В цілому отримані результати свідчать про те, що в складних умовах, що характеризуються невизначеністю ситуації і обмеженим частотно-енергетичним ресурсом, існують резерви істотного підвищення ефективності радіозв'язку з БПЛА на основі використання керованих радіоканалів з узгодженою адаптацією багатоантенних систем на передавальній і приймальній сторонах.

Слід зауважити, що підхід, що розвивається, припускає заданими частотно-часові перетворення на передавальній і приймальній сторонах. Тому проблема сумісності відомих технологій, використовуваних для комерційного радіозв'язку, і запропонованої, автоматично вирішується, що є важливою практичною гідністю запропонованого підходу.

Висновки

Розглянуто теоретичне узагальнення і запропоновано нове рішення проблеми забезпечення зростаючих вимог до швидкості і достовірності передачі даних в каналах радіозв'язку з БПЛА, що полягає в розвитку технології багатоантенного радіозв'язку в умовах ситуаційної невизначеності на основі керованих динамічних радіоканалів з адаптивним узгодженням характеристик спрямованості антенних систем на передавальній і приймальній сторонах.

Технологія керованих динамічних радіоканалів може розглядатися в якості основи для нової стратегії ефективного радіозв'язку при обмеженому час-

тотно-енергетичному ресурсі із стаціонарними, рухливими та високорухливими об'єктами різного базування, які функціонують в складних і невизначених заводських умовах, – технології КОГНІТИВНОГО РАДІО для військової сфери застосування.

Така технологія дозволить суттєво заощадити частотно-енергетичний ресурс і істотно підвищити спектральну інформаційну ефективність радіозв'язку, наближаючи її до дротяних і кабельних ліній

Подальші дослідження у рамках підходу, що розвивається, доцільно продовжити у напрямі конвергенції існуючих МІМО технологій і їх різновидів, пов'язаних з технологіями формування променя і адаптивних антенних приймальних систем. При цьому мова йдеться про розробку технології керованих динамічних МІМО радіоканалів з можливостями індивідуальної самокерування кожного з радіоканалів до ситуаційної невизначеності умов, які складаються в кожному з каналів радіозв'язку. При цьому важливими питаннями є швидкодія, що забезпечується, процедурами адаптації багатоантенних систем на передавальному та приймальному боках в керованих радіоканалах зв'язку з БПЛА.

Список літератури

1. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА стран НАТО / В. Слюсар // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2010. – № 3. – С. 80-86.
2. STANAG 4609/AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. – standard/4909/4609.htm.
3. STANAG 7023/AEDP-9. NATO Digital Motion Imagery Format. – standard/7023/7023.htm.
4. STANAG 7085. Inoperable Data Links for Imaging Systems.
5. Шахнович И.И. Современные технологии беспроводной связи / И.И. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
6. Вишневецкий В.М. Энциклопедия WiMAX: путь к 4G / В.М. Вишневецкий, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2009. – 472 с.
7. Крылов Ю. Стандарт IEEE 802.11n: решение от компании metalink / Ю. Крылов // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2006. – № 7. – С. 12-17.
8. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин и др.; под ред. В.В. Крылова. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 368 с.
9. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко; под ред. А.Г. Зюко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
10. Поспелов Б.Б. Реализация концепции адаптируемого канала связи в авиационных радиолниях / Б.Б. Поспелов // *Радиотехника.* – 2002. – Вып. 128. – С. 197-205.
11. Кириллов Н.Е. Пространственно-временные характеристики линейных каналов с переменными параметрами / Н.Е. Кириллов, В.А. Соифер // *Проблемы передачи информации.* – 1972. – Т. VIII, № 2. – С. 48-54.
12. Кловский Д.Д. Обработка пространственно-временных сигналов / Д.Д. Кловский, В.А. Соифер. – М.: Связь, 1976. – 206 с.
13. Стратонович Р.Л. Теория информации / Р.Л. Стратонович. – М.: Сов. радио, 1975. – 423 с.
14. Поспелов Б.Б. Оптимізація обробки в МІМО-системах в умовах використання різних видів модуляції та дії зовнішніх завад / Б.Б. Поспелов, Д.Л. Четоткін, С.В. Штангей // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи: ХАІ.* – 2009. – Вып. 4(38). – С. 42-46.
15. Поспелов Б.Б. Комплексная оптимизация беспроводных каналов связи / Б.Б. Поспелов // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* – 2010. – № 2. – С. 162-167.
16. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

Надійшла до редколегії 1.10.2010

Рецензент: д-р тех. наук, проф. В.В. Лукин, Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

ТЕХНОЛОГИЯ СВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ РАДИОКАНАЛОВ

Б.Б. Поспелов, А.В. Тоцкий

Дано теоретическое обобщение и предложено новое решение проблемы эффективной радиосвязи с БПЛА на основе управляемых динамических радиоканалов с адаптивным согласованием характеристик направленности на передающей и приемной сторонах.

Ключевые слова: радиосвязь, радиоканал, управляемый динамический радиоканал, адаптация.

TECHNOLOGY OF CONNECTION WITH PILOTLESS AIRCRAFTS ON THE BASIS OF THE GUIDED DYNAMIC RADIO CHANNELS

B.B. Pospelov, A.V. Totsky

Theoretical generalization is given and new solution of problem of effective radio contact is offered with by pilotless aircrafts on the basis of the guided dynamic radio channels with the adaptive concordance of descriptions of orientation on transmitter and receiving parties.

Keywords: radio contact, radio channel, guided dynamic radio channel, adaptation.