

УДК 681.5.03.033

А.О. Ковальчук, О.В. Коломійцев, Д.В. Максюта, О.О. Сосунов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОЦІНКА ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ПІДСИСТЕМ АВТОСУПРОВОДЖЕННЯ ЗА КУТОВОЮ КООРДИНАТОЮ ТА РАДІАЛЬНОЮ ШВИДКІСТЮ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ РЛС З ФАЗОВАНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ УТОЧНЕНОЇ МОДЕЛІ

*Запропоновано використовувати уточнену модель для оцінки одного з показників якості – пропускної спроможності підсистем автосупроводження за кутовою координатою та радіальною швидкістю багатоканальною РЛС з фазованою антенною решіткою. Оцінки показника якості підсистем, що розраховані на підставі уточненої моделі, зіставлені з результатами, що отримані за допомогою вихідної моделі.*

**Ключові слова:** автосупроводження за кутовою координатою, автосупроводження за радіальною швидкістю, пропускна спроможність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Багатоканальні РЛС з фазованими антенними решітками (БК РЛС з ФАР) є складними технічними пристроями, що вирішують різноманітні завдання по пошуку, супроводженню, оцінюванню координат повітряних об'єктів (ПО). В даний час такі РЛС широко використовуються в комплексах радіолокації завдяки ряду своїх безперечних переваг, зокрема багатоканальності за рахунок часового розділення каналів. У БК РЛС з ФАР при супроводженні визначеного ПО послідовні моменти вимірювання його координат розділяються інтервалами часу тривалістю  $T$ .

У режимі супроводження одним з показників якості функціонування БК РЛС з ФАР може бути прийнята пропускна спроможність. У роботах [1, 2] управління тривалістю інтервалу часу між радіоконтактами використовується для оптимізації вказаного показника якості. При використанні квазінеперервного сигналу це системи автосупроводження за кутовими координатами, дальністю і радіальною швидкістю. Параметри кожної з вищезгаданих слідкуючих систем автосупроводження впливають на пропускну спроможність (один з показників якості) БК РЛС з ФАР. Дослідження такого впливу дозволить визначити найбільш критичну систему автосупроводження, вдосконалення якої забезпечить найбільший приріст показника якості. Крім цього, при розв'язанні задачі синтезу (при зворотній постановці задачі) можна обґрунтувати вимоги до характеристик слідкуючих систем.

У роботі [3] дослідження проведено для системи автосупроводження за кутовою координатою, причому результати отримані при допущенні про незалежність середнього часу пошуку і захоплення  $\bar{t}_{\text{пз}}$  повітряного об'єкту від кількості вільних каналів, що не відповідає дійсності. У роботі [4] для системи автосупроводження за кутовою координатою досліджен-

ня проведено вже на основі уточненої моделі [5], в якій враховується залежність величини  $\bar{t}_{\text{пз}}$  від кількості вільних каналів супроводження. Тому доцільно проведення аналогічного дослідження й для системи автосупроводження за радіальною швидкістю з порівнянням результатів для обох систем.

**Метою даної статті** є порівняльна оцінка потенційної пропускної спроможності БК РЛС з ФАР для підсистем автосупроводження за кутовою координатою та за радіальною швидкістю за допомогою двох моделей – вихідної моделі, яка не враховує залежність середнього часу пошуку і захвату  $\bar{t}_{\text{пз}}$  повітряного об'єкту від кількості вільних каналів супроводження, і уточненої моделі [5], в якій такий облік відбувається. Дослідження буде проведено при різних відношеннях сигнал/шум  $q$  на основі постановки задачі оптимізації, викладеної в [2], з використанням еквівалентних статистичних характеристик кутового та частотного дискримінаторів з роботи [6].

### Виклад основного матеріалу

Базовою (вихідною) моделлю задачі оптимізації є двофазна модель масового обслуговування з використанням еквівалентних статистичних характеристик кутового та частотного дискримінаторів, що описана в роботах [2, 3, 7].

При використанні таких характеристик в роботі [6] запропонований показник якості радіотехнічної слідкуючої системи – ймовірність стійкого супроводження  $p_n$ .

Цій показник є ймовірність знаходження помилки супроводження ПО к наступному радіоконтакту в межах апертури еквівалентної характеристики дискримінатора. Показник  $p_n$  за відсутності систематичної помилки є функцією тривалості інтервалу часу  $T$  між радіоконтактами і відношення сигнал/шум  $q$  і неявним чином входить у функціонал пропускної спроможності  $R$  [2].

За допомогою показника  $R$  можна оцінити тільки потенційну (максимально досягну) пропускну спроможність.

Для стохастичної моделі руху [8] ПО, а також при адекватності прийнятої моделі руху ПО його реальному руху (за відсутності систематичної помилки) показник  $p_n$  може бути розрахований по наступній формулі [6]:

$$p_n = \Phi\left(\frac{L_x}{2\sqrt{2}\sigma_e}\right), \quad (1)$$

де  $\Phi(\cdot)$  – функція Лапласа;  $L_x$  – ширина апертури еквівалентної дискримінаційної характеристики дискримінатора;  $\sigma_e^2 = D_e$  – дисперсія помилки екстраполяції координати  $\Delta x_e$  повітряного об'єкту.

У свою чергу помилки екстраполяції координат ПО залежать як від помилок одиничних спостережень, що характеризуються дисперсією, залежною від відношення сигнал/шум  $q$  [9], і маневрених характеристик ПО, так і від тривалості інтервалу часу  $T$  між радіоконтактами (тривалості інтервалу часу прогнозу). Проте при адекватності прийнятої моделі руху ПО його реальному руху помилки екстраполяції координат не містить систематичної складової, і для конкретної координати (радіальна швидкість, дальність, кутові координати) дисперсія помилки екстраполяції може бути розрахована на основі відомих методик [9].

Слід зазначити, що для різних координат ПО залежності помилок екстраполяції від тривалості  $T$  інтервалу часу між радіоконтактами носять різний характер. Тому при визначенні  $p_n$  необхідно або враховувати вірогідність стійкого супроводження по всіх координатах, або використовувати ту залежність, яка є визначальний.

Середня кількість радіоконтактів до зриву супроводження  $n_e$  при геометричному розподілі визначається по формулі [2]:

$$n_e = \frac{1}{1-p_n}, \quad (2)$$

що однозначно визначає середній час до зриву супроводження  $\bar{t}_{зр}$ :

$$\bar{t}_{зр} = \frac{T}{1-p_n}. \quad (3)$$

Визначення ширини еквівалентної дискримінаційної характеристики дискримінатора  $L_x$  є самостійною достатньо складною задачею, що вимагає проведення об'ємного статистичного дослідження. Головним критерієм при підборі залежності еквівалентного розміру апертури  $L_x$  від відношення сигнал/шум  $q$ , що гарантує можливість використання

формули (1) для оцінки вірогідності відсутності зриву супроводження, має бути збіг результатів статистичних випробувань на стійкість супроводження системи з реальним дискримінатором і аналітичних розрахунків, що виконуються згідно (1).

Вихідним результатом рішення даної задачі є залежність апроксимації еквівалентної ширини дискримінаційної характеристики дискримінатора  $L_x$  від відношення сигнал/шум  $q$ .

У роботі [2] проведений аналіз можливих шляхів рішення задачі оптимізації і показано, що рішення цієї задачі в загальному випадку пов'язане з великими труднощами.

Найпростіший випадок відповідає показовим законам розподілу випадкових величин – інтервалів часу між видачею цілевказівок  $t_{цв}$ , пошуку і захопту  $t_{пз}$ , супроводження  $t_{суп}$  і до зриву супроводження  $t_{зр}$ .

В цьому випадку двофазна модель масового обслуговування є Марківською з дискретним простором станів (рис. 1).

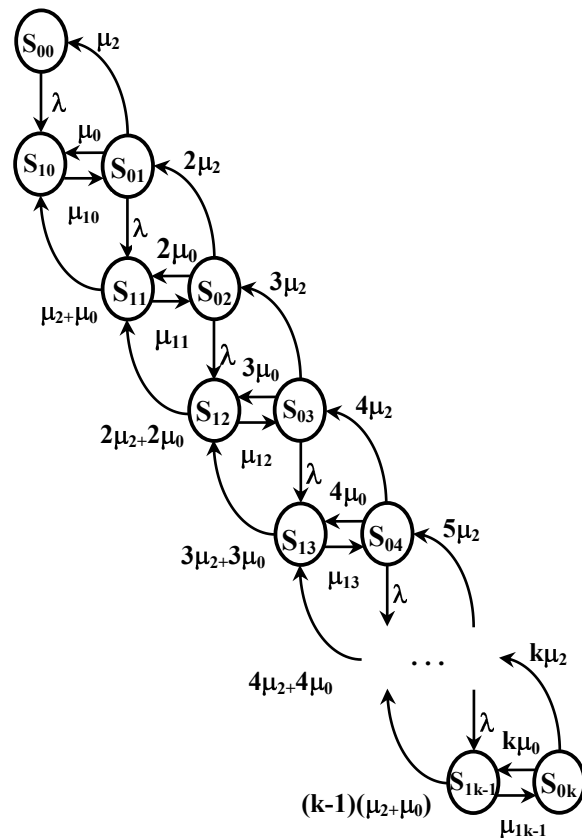


Рис. 1. Граф переходів уточненої двофазної Марківської моделі для  $k$  каналів

По графові переходів між станами виписується система диференціальних рівнянь для ймовірності станів  $S_{ij}$ , де  $i$  – кількість ПО на етапі пошуку і захопту,  $j$  – кількість ПО на етапі супроводження. Показник  $R$

розраховується через фінальні ймовірності станів і рішення задачі може бути отримано аналітично [10]:

$$R = \frac{\mu_2}{\lambda} \left( \sum_{j=1}^{k-1} j(P_{0j} + P_{1j}) + kP_{0k} \right) = \frac{\bar{t}_{\text{цв}}}{\bar{t}_{\text{суп}}} \left( \sum_{j=1}^{k-1} j(P_{0j} + P_{1j}) + kP_{0k} \right), \quad (4)$$

де  $P_{ij}$  – фінальні ймовірності станів  $S_{ij}$ ;  $\mu_2 = 1/\bar{t}_{\text{суп}}$  – інтенсивність супроводження;  $\lambda = 1/\bar{t}_{\text{цв}}$  – інтенсивність потоку цілевказівок;  $\bar{t}_{\text{цв}}$  – середня тривалість інтервалу часу між цілевказівками;  $\bar{t}_{\text{суп}}$  – середня тривалість інтервалу часу супроводження ПО;  $k$  – кількість каналів супроводження (другої фази).

Крім цього, необхідно отримати залежності показника  $r_n$  від тривалості інтервалу часу  $T$  між радіоконтактами для різних відношень сигнал/шум  $q$ .

Для ймовірності стійкого супроводження  $r_n$

використовуватимемо результати роботи [6], в якій приведені залежності показника  $r_n$  від тривалості інтервалу часу  $T$  між радіоконтактами для декількох відношень сигнал/шум  $q$ , що отримані при використанні еквівалентних статистичних характеристик кутового та частотного дискримінаторів.

Для отримання чисельних оцінок і зіставності результатів даної статті і робіт [3, 4] приймемо вихідні дані, як і в роботах [3, 4]: середня тривалість інтервалів часу між цілевказівками  $\bar{t}_{\text{цв}} = 20$  с, середня тривалість інтервалів часу пошуку і захвату  $\bar{t}_{\text{пз}} = 1/\mu_{10} = 10$  с ( $\mu_{1j} = \mu_{10}(1 - j/k)$ ), середня тривалість інтервалів часу супроводження  $\bar{t}_{\text{суп}} = 40$  с, середня тривалість інтервалів часу до зриву супроводження:

$$\bar{t}_{\text{зр}} = 0,017k / (1 - r_n(0,017k)), \quad (5)$$

для відношень сигнал/шум  $q = 2, 3, 5$ . Аргумент у показника  $r_n$  в формулі (5) вказує тривалість інтервалу часу між радіоконтактами  $T$ .

Результати розрахунків приведені на рис. 2.

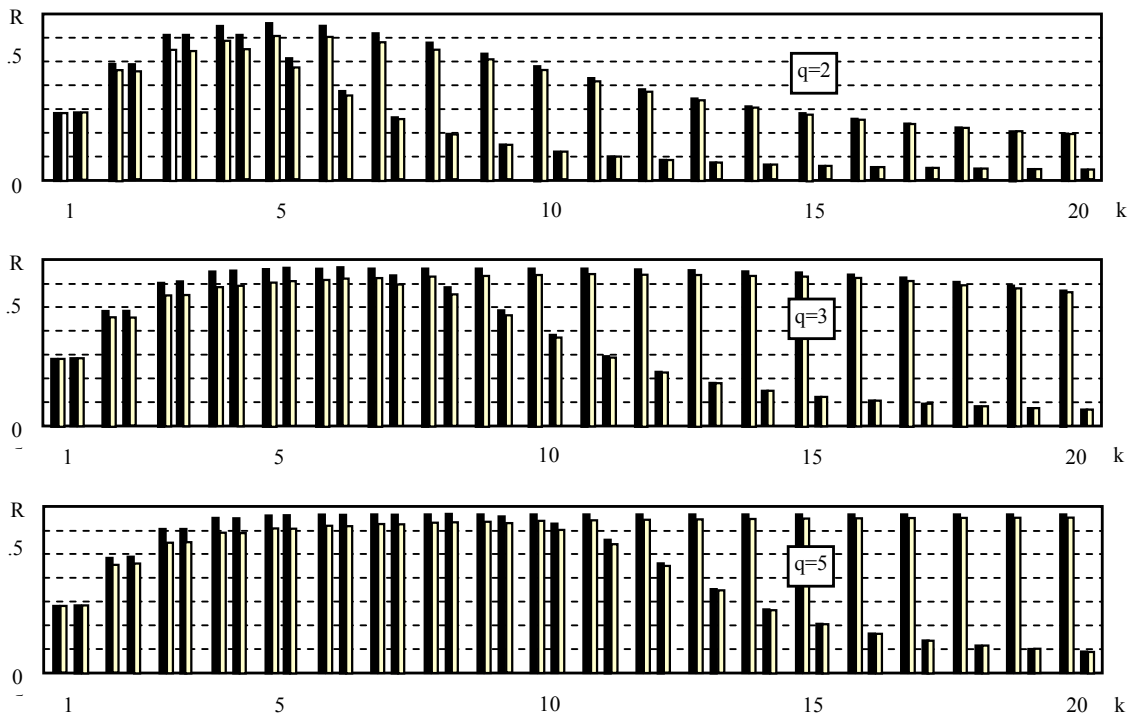


Рис. 2. Залежність пропускної спроможності  $R$  від кількості каналів  $k$  при декількох відношеннях сигнал/шум  $q$  для систем автосупроводження за кутовою координатою (перша пара стовбців) та за радіальною швидкістю (друга пара стовбців): ■ – вихідна модель; ▒ – уточнена модель

### Висновки

1. Для відношень сигнал/шум  $q \geq 3$  максимум пропускної спроможності  $R$  слабо залежить від кількості каналів супроводження  $k$  для підсистеми автосупроводження за кутовою координатою та більш суттєво залежить від  $k$  для підсистеми авто-

супроводження за радіальною швидкістю незалежно від використовуваної моделі.

2. Значення показника пропускної спроможності  $R$ , що розраховані за допомогою існуючої і уточненої моделі для обох підсистем, відрізняються не більше ніж на 10% при всіх відношеннях сигнал/шум  $q$ .

3. Для обох підсистем при відношеннях сигнал/шум  $q \geq 3$  максимум пропускної спроможності досягається при кількості каналів супроводження  $k \geq 5$  при використанні вихідної моделі і при кількості каналів  $k \geq 6$  при використанні уточненої моделі.

Таким чином, оптимальна кількість каналів супроводження, при якій забезпечується максимум пропускної спроможності  $R$  обох підсистем, практично не залежить від того, яка модель використовується – вихідна або уточнена.

### Список літератури

1. Самойленко В.И. Управление фазированными антенными решетками / В.И. Самойленко, Ю.А. Шишов. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
2. Ковальчук А.А. Постановка задачи оптимизации пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой путем управления длительностью интервала времени между радиоконтактами / А.А. Ковальчук, Ю.Э. Парфенов, А.А. Сосунов, В.Ш. Хисматулин // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 1. – С. 76-83.
3. Ковальчук А.А. Оценка потенциальной пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой для подсистемы автосопровождения по угловой координате / А.А. Ковальчук, И.И. Сачук, А.А. Сосунов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 5. – С. 35-37.
4. Печкін А.М. Оцінка показника якості підсистеми автосупроводження за кутовою координатою багатоканальної РЛС з фазованою антенною решіткою двома моделями / А.М. Печкін // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 3 (77). – С. 79-81.
5. Васильев В.А. Уточнена модель для обґрунтування вимог до показника якості радіотехнічної слідуючої системи зенітного ракетного комплексу / В.А. Васильев, І.І. Сачук, О.О. Сосунов // Системи озброєння і військової техніки. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 2(14). – С. 28-30.
6. Хисматулин В.Ш. Оценка вероятности надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией / В.Ш. Хисматулин, И.И. Сачук, А.А. Ковальчук // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2001. – Вып. 22. – С. 259-262.
7. Кулинич И.А. Модель для обоснования требований к показателю качества радиотехнической следящей системы / И.А. Кулинич, Ю.Э. Парфенов, А.А. Сосунов // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 5. – С. 145-150.
8. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью / Р.А. Зингер // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 40-57.
9. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: Издательство КвіЦ, 2000. 428 с.:илл.
10. Ковальчук А.А. Оценка влияния отношения сигнал/шум на пропускную способность многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой при использовании квазинепрерывного сигнала / А.А. Ковальчук, А.А. Сосунов, В.Ш. Хисматулин // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 4. – С. 94-99.

Надійшла до редколегії 8.07.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є.Л. Казаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ПОДСИСТЕМ АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ ПО УГЛОВОЙ КООРДИНАТЕ И РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ С ПОМОЩЬЮ УТОЧНЕННОЙ МОДЕЛИ

А.А. Ковальчук, А.В. Коломийцев, Д.В. Максютя, А.А. Сосунов

Предложено использовать уточненную модель для оценки одного из показателей качества – пропускной способности подсистем автосопровождения по угловой координате и радиальной скорости многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой. Оценки показателя качества подсистем, рассчитанные на основе уточненной модели, сопоставлены с результатами, полученными с помощью исходной модели.

**Ключевые слова:** автосопровождение по угловой координате, автосопровождение по радиальной скорости, пропускная способность.

### THE ANGLE TRACKING AND THE RADIAL SPEED TRACKING SUBSYSTEMS QUALITY PARAMETER ESTIMATION OF MULTICHANNEL PHASE-ARRAY RADAR BY THE IMPROVED MODEL

A.A. Kovalchuk, A.V. Kolomyitsev, D.V. Maxyuta, A.A. Sosunov

It is suggested to use the improved model for the estimation of one of quality parameters – the angle tracking and the radial speed tracking subsystems quality parameter of multichannel phase-array radar. The estimations of subsystems quality parameter obtained on the basis of the improved model are compared with the results got by an initial model.

**Keywords:** angle tracking, radial speed tracking, throughput.