

DOI: 10.18372/2310-5461.47.14930

УДК623.6-523.8:623.4.017

В. В. Костановський, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0002-3766-4455
e-mail: kostanval03@gmail.com;

О. Д. Козачук
ДК «Укроборонпром» ДП «НДІ «Квант»
orcid.org/0000-0003-0905-1093
e-mail: kozaichyk@gmail.com;

І. О. Мачалин, д-р техн. наук, проф.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-1684-4980
e-mail: tks@nau.edu.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ АФАР У ПРИЙМАЛЬНОМ РЕЖИМІ ЗА КРИТЕРІЄМ ДОПУСТИМОГО ПОГІРШЕННЯ РІВНЯ БОКОВИХ ПЕЛЮСТОК

Актуальність

Сьогодні провідні країни світу широко використовують радіолокаційні станції (РЛС) з фазованими антенними решітками (ФАР) для створення засобів протиракетної оборони (ПРО) і захисту повітряного простору з використанням зенітних ракетних комплексів (ЗРК). У процес створення активних ФАР нових РЛС вкладаються величезні фінансові кошти за використання новітньої елементної бази і сучасних комп'ютерних технологій.

Безперервне зростання складності активних фазованих антенних решіток (АФАР) корабельних радіолокаційних станцій (РЛС): AN/SPY-1, AN/SPY-2, AN/SPY-5, DBR, XTR-1, APAR, розширення функцій, які ними виконуються призвели до того, що для розроблення, виготовлення та експлуатації нових РЛС з АФАР американські компанії «Рейтейон», «Локхід-Мартін» і «Нортроп-Грумман» тощо, витрачають величезні кошти обсягом десятків і сотень мільйонів доларів. При цьому значні кошти вкладаються компаніями в розробку нових надійних НВЧ-приладів на базі арсеніду і нітриду галію, а також в розробку нових методів оцінки надійності та ефективності АФАР [1].

Постановка проблеми

Однією з основних проблем під час проектування РЛС з АФАР є забезпечення її високої надійності в процесі експлуатації.

Для вирішення цієї проблеми необхідна розробка сучасних математичних моделей надійності

АФАР, які враховують архітектуру побудови і фізичні процеси функціонування АФАР.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробці методів розрахунку надійності АФАР присвячено декілька праць зарубіжних та вітчизняних авторів [2–11].

У працях професора А. К. Агравала [2–4] розглядається розрахунок надійності АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток. У праці [2] досліджується надійність АФАР, представленої матрицею на 8000 елементів зі значенням амплітуди головної бічної пелюстки розподілу Тейлора, рівному 40 дБ і гексагональною структурою розміщення випромінювачів, відстань за елементами якої становить половину довжини хвилі. Відмовою АФАР за цим вважається підвищення мінімального рівня ближніх бічних пелюсток вище максимально допустимого рівня. Відмова АФАР настає під час перевищення граничнодопустимої кількості відмов будь-якого з трьох типів компонентів антени: приймально-передавальних модулів ($N_{T/R} = 8000$), модулів керування ($N_{CM} = 1000$) та джерел живлення ($N_{PS} = 1000$).

У праці [2] представлені значення граничнодопустимої кількості відмов компонентів АФАР: під час підвищення рівня бокових пелюсток на 3 дБ:

$$F_{T/R} = 256; F_{CM} = 5; F_{PS} = 5.$$

та під час підвищення рівня бокових пелюсток на 6 дБ:

$$F_{T/R} = 512; F_{CM} = 10; F_{PS} = 10.$$

Граничні кількості відмов приймально-передавальних модулів $F_{T/R}$, модулів керування F_{CM} та джерел живлення F_{PS} у праці [2] визначались методом статистичного моделювання рівня бокових пелюсток АФАР.

У праці [2] представлена формула для визначення середнього наробітку на відмову АФАР ($MTBF_{ANT}$):

$$MTBF_{ANT} = \left[(F_{T/R} * MTBF_{T/R} / N_{T/R})^{-1} + (F_{CM} * MTBF_{CM} / N_{CM})^{-1} + (F_{PS} * MTBF_{PS} / N_{PS})^{-1} \right]^{-1} \quad (1)$$

де

$$MTBF_{T/R} = 200\,000 \text{ год.};$$

$$MTBF_{CM} = 100\,000 \text{ год.};$$

$$MTBF_{PS} = 50\,000 \text{ год.};$$

$$MTBF_{ANT} \approx 162 \text{ год.}$$

Вигляд формули (1) дозволяє зробити висновок, що надійність АФАР у роботі описується експоненціальним розподілом імовірності відмов.

Це є недоліком запропонованої у праці [2] моделі надійності, тому що надлишкова структура АФАР характеризується відмовами основних і резервних каналів і повинна описуватися розподілом наробітку на відмову близьким до нормального.

У працях [5–11] автором розглядаються моделі надійності АФАР під час раптових і поступових відмов приймально-передавальних каналів і модулів вторинного харчування.

При цьому як критерій відмов використовується допустима кількість відмов випромінюючих (передавальних) каналів, допустиме зниження максимальної дальності РЛС і допустима кількість відмов антенних фазованих підрешіток.

До недоліків моделей надійності, представлених у працях [5–11], слід віднести неможливість визначення показників надійності АФАР у режимі прийому, оскільки в явному вигляді як критерій відмови не використовується допустиме погіршення рівня бічних пелюсток.

Професором А. К. Агравалом у праці [2] представлена найпростіша модель надійності для визначення середнього наробітку до відмови АФАР, яка використовує як критерій відмови допустиме погіршення рівня бічних пелюсток АФАР.

Однак ця модель не враховує надмірність випромінюючих модулів в антенній решітці і закони розподілу відмов, що формують АФАР каналів і модулів.

Постановка завдання

Метою даної роботи є розробка моделі розрахунку показників надійності АФАР багатофункціональної РЛС у приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток.

Визначення показників моделі надійності АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток

Визначення залежності рівня бічних пелюсток від відносної кількості відмовивших випромінюючих каналів

Рівень бічних пелюсток (РБП) (sidelobe level, SLL) діаграми спрямованості (ДС) антени — відносний (нормований до максимуму ДС) рівень випромінювання антени в напрямку бічних пелюсток. Як правило, РБП виражається в децибелах, рідше його визначають «за потужністю» або «за полем». Бічні пелюстки ДС АФАР характеризують рівень випромінювання і приймання електромагнітної енергії поза основним напрямом (головної пелюстки). Цей недолік антен знижує перешкодозахищеність РЛС і скритність РЛС, а також у ряді випадків може призводити до появи хибних оцінок.

Формула для визначення рівня бічних пелюсток (квантування фазообертачів) для плоскої АФАР при рівномірному амплітудному розподілі запропонована проф. Р. С. Хансеном у праці [12]:

$$q_{\Sigma 0} = \sqrt{\delta^2 / N}; \quad (2)$$

$$\delta^2 = \frac{\pi^2}{3 \times 4^M}, \quad (3)$$

де N — розрядність фазообертача.

При $N = 3$ формула для РБП має такий вигляд:

$$q_{\Sigma 0} = \sqrt{\delta^2 / N} = \frac{\pi}{2^M \sqrt{3N}} = \frac{\pi}{8\sqrt{3N}},$$

або в децибелах

$$\log(q_{\Sigma}) = \log\left(\frac{\pi}{8\sqrt{3N}}\right).$$

На рис. 1 представлені графіки залежностей логарифма середньоквадратичного значення (с.к.з.) рівня бічних пелюсток, зумовлене випадковою похибкою квантування фази від кількості випромінюючих елементів в АФАР, залежно від логарифма кількості випромінюючих елементів в АФАР.

Ці графіки побудовані з використанням формули (3) і повністю збігаються з представленими в праці [12] аналогічними залежностями.

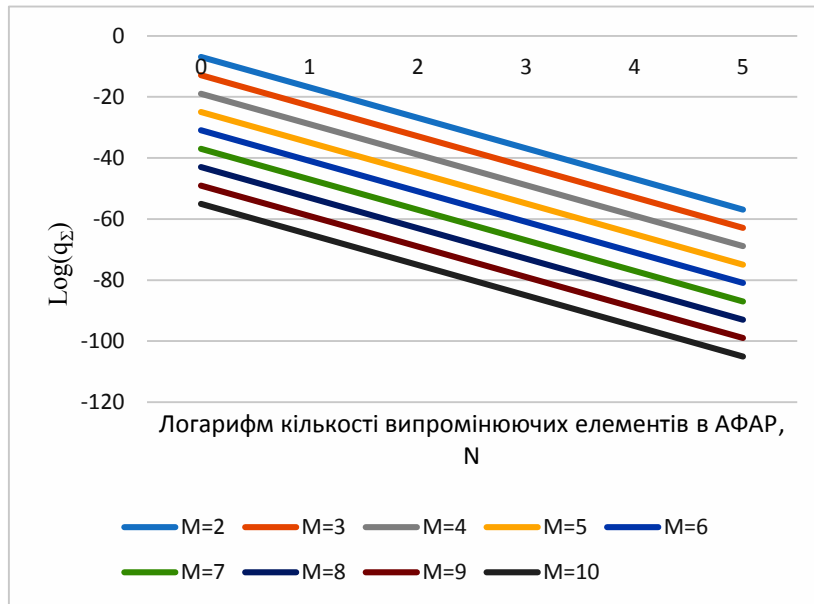


Рис. 1. Графіки залежностей логарифма середньоквадратичного значення рівня бічних пелюсток, зумовлені випадковою похибкою квантування фази, від логарифма кількості випромінюювальних елементів в АФАР для різних значень керуючих сигналів фазообертача M:
 для M = 2 — лінія блакитного кольору; для M = 3 — лінія червоного кольору;
 для M = 4 — лінія сірого кольору; для M = 5 — лінія жовтого кольору;
 для M = 6 — лінія синього кольору; для M = 7 — лінія зеленого кольору;
 для M = 8 — лінія темно-синього кольору; для M = 9 — лінія коричневого кольору;
 для M = 10 — лінія темно-зеленого кольору

Як видно з рис. 1, логарифм середньоквадратичного значення (с.к.з.) рівня бічних пелюсток лінійно зменшується при збільшенні логарифма кількості випромінюючих елементів в АФАР. Логарифм с.к.з. рівня РБП лінійно зменшується зі збільшенням числа керуючих сигналів фазообертача M.

Побудова структурних схем надійності приймально-передавальної АФАР

Водночас кількість випромінюючих (передавальних) каналів у приймально-передавальній АФАР може коливатися від однієї тисячі до кількох десятків тисяч. Для забезпечення керуваності НВЧ-сигналів у процесі експлуатації, АФАР конструктивно фрагментують на низку підрешіток — S_0 , кожна з яких характеризується своїм значенням амплітуди і фази НВЧ сигналу для всіх приймально-передавальних каналів даної підрешітки. При цьому кожна підрешітка містить G_0 приймально-передавальних каналів. Відповідно, загальна кількість приймально-передавальних каналів АФАР дорівнює $N_0 = G_0 S_0$. Тому для типової

АФАР характерною буде дворівнева структурна схема надійності, представлена на рис. 2 і 3.

У АФАР на випромінювання (передавання) працюють передавальні канали, а на приймання — приймальні канали. Конструктивно приймальний і передавальний канали можуть оформлятися в один приймально-передавальний модуль (ППМ). У АФАР зазвичай використовують два види ППМ: антенні приймально-передавальні модулі решітки — АППМ і приймально-передавальні модулі підрешітки — ППМП.

Дворівнева структурна схема надійності приймально-передавальної АФАР багатфункціональної РЛС включає: N_0 — загальна кількість приймально-передавальних каналів; S_0 — кількість приймально-передавальних антенних підрешіток; G_0 — кількість приймально-передавальних каналів у антенній підрешітці; m_G — допустима кількість відмов приймально-передавальних каналів у антенній підрешітці; m_S — допустима кількість умовних відмов приймально-передавальних антенних підрешіток в АФАР.

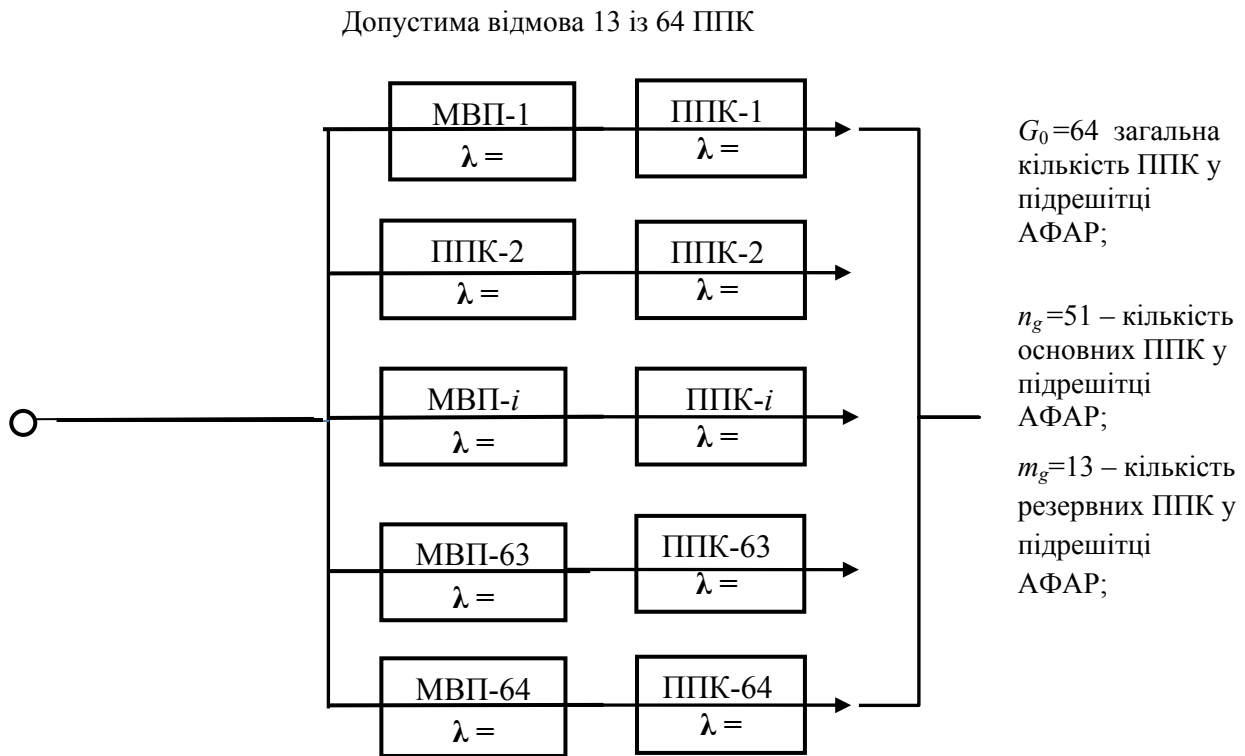


Рис. 2. Структурна схема надійності антенної фазованої підрешітки на 64 ППК (перший рівень структурної схеми надійності АФАР)

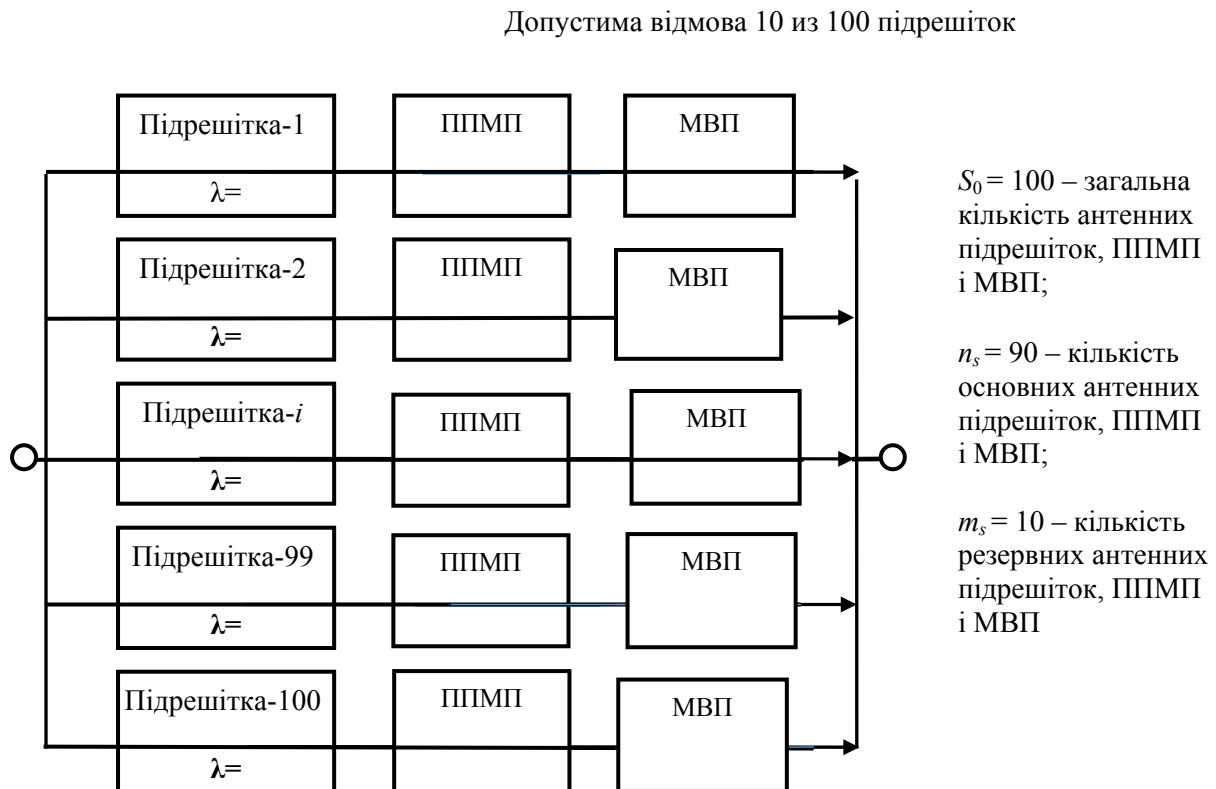


Рис. 3. Структурна схема надійності приймально-передавальної АФАР (другий рівень структурної схеми надійності АФАР) багатофункціональної РЛС

Критерій відмови АФАР у приймальному режимі

Під час відмов приймально-передавальних каналів АФАР рівень бокових пелюсток погіршується. Залежність підвищення рівня бокових пелюсток від відносного зменшення кількості дієздатних випромінюючих каналів можливо апроксимувати поліноміальною функцією:

$$q_{\Sigma} \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) = q_{\Sigma 0} \left[1 + S_1 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) - S_2 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^2 + S_3 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^3 \right] \tag{4}$$

Залежності (4) значення коефіцієнтів S_1, S_2, S_3 необхідно визначати методом імітаційного (статистичного) моделювання для кожного зразка АФАР.

Для круглої плоскої антенної решітки на 8000 випромінюючих каналів з круговим амплітудно-фазовим розподілом Тейлора на 40 dB, з розташуванням випромінювачів у вузлах гексагональної сітки апертури АФАР, що представлена американськими проф. Е. Л. Хольцманом і А. К. Агравалом у праці [2] залежність рівня бічних пелюсток від відносного зменшення кількості приймально-передавальних каналів можна зобразити поліноміальною функцією (4), для якої коефіцієнти S_1, S_2, S_3 мають таке значення:

$$S_1 = 43,37, S_2 = 221,6, S_3 = 995.$$

Під час оцінювання надійності плоскої АФАР на 6400 передавальних каналів, досліджуваної в

даній роботі, для апроксимації залежності погіршення рівня бічних пелюсток від зменшення відносної кількості працездатних випромінюючих (приймально-передавальних каналів) застосовується та сама поліноміальна залежність (4). Для плоскої АФАР (на 6400 передавальних каналів) коефіцієнти для РБП мають таке значення:

$$S_1 = 43,37; S_2 = 221,6; S_3 = 995,$$

тоді формула (4) перетворюється:

$$q_{\Sigma} \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) = 3,142 \left[1 + 43,37 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) - 221,6 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^2 + 995 \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)^3 / 8\sqrt{(3 \times 6400)} \right]. \tag{5}$$

На рис. 4 представлені графіки погіршення РБП від відносного значення кількості відмовивших випромінюючих каналів для АФАР на 8000 випромінюючих елементів и для АФАР на 6400 випромінюючих елементів, які досліджуються в цій роботі.

На рис. 4 видно, що графіки залежності логарифма с.к.з РБП ДС зі збільшенням кількості відмовивших випромінюючих каналів лінійно зростають.

При цьому графік погіршення РБП для АФАР на 8000 випромінюючих елементів розташовується на 1 dB вище графіка для АФАР на 6400 випромінювачів.

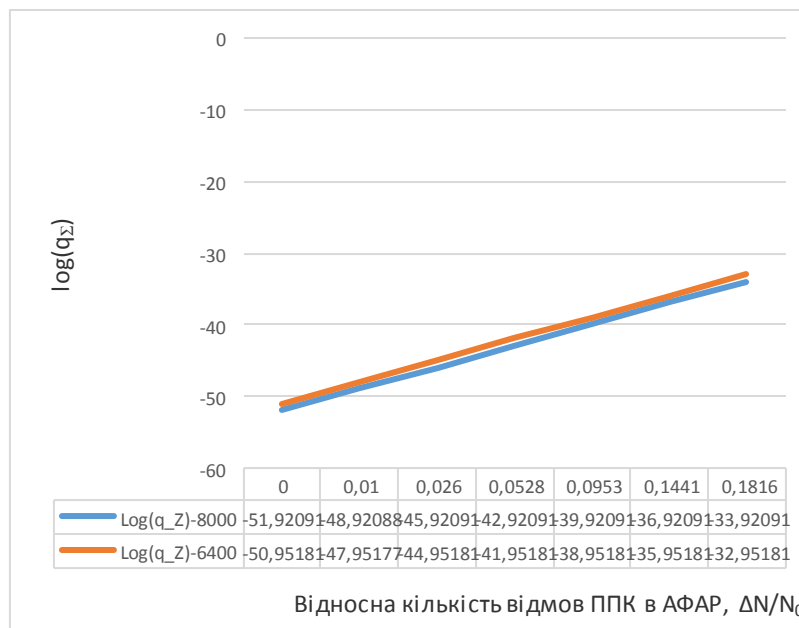


Рис. 4. Залежність погіршення логарифма с.к.з. РБП ДС від відносної кількості відмовивших ППК в АФАР: крива червоного кольору визначає погіршення РБП АФАР на 8000 ППК; крива синього кольору визначає погіршення РБП для АФАР

Виходячи з вищевикладеного можна сформулювати критерій відмови приймально-передавальної АФАР в приймальному режимі як допустиме погіршення рівня бічних пелюсток (РБП) активної фазованої антенної решітки, що виявляється в перевищенні логарифма РБП ДС антенної фазованої решітки вище допустимого рівня

$$-\left\{ \log \left[q \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп}} : \log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (T_{0_АФАР}) \right] - \log \{ q \} \right\} \times \left\{ \left[\frac{\Delta N}{N_0} (t=0) \right] \right\} \leq \left\{ \Delta \log \left[q \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп}} \quad (6)$$

Побудова математичної моделі надійності приймально-передавальної АФАР в приймальному режимі

Для розрахунку надійності, АФАР, яка досліджується у цій статті використовується поліноміальна залежність РБП ДС від відносної кількості відмов $\frac{\Delta N}{N_0}$ формула (5).

Відносна кількість відмов ППК при довільному розподілі відмов каналів і модулів АФАР (з урахуванням структурних схем надійності) визначається за формулою:

$$\frac{\Delta N}{N_0}(t) = 1 - P_{ППК}(t) P_{ППМП}(t) [P_{МВП}(t)]^2 \quad (7)$$

Для експоненціального розподілу відмов каналів та модулів формула (7) для відносної кількості відмов ППК спрощується:

$$\frac{\Delta N}{N_0}(t) = 1 - \exp \left[-\frac{t}{T_{0_ППК}} \left(1 + \frac{T_{0_ППК}}{T_{0_ППМП}} + \frac{2T_{0_ППК}}{T_{0_МВП}} \right) \right] \quad (8)$$

Використовуючи формули (5), (7) та умову (6), формується трансцендентне рівняння:

$$\log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК}) \right] - \log q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (t=0) \right] \right\} = \left\{ \Delta \log \left[q \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \right] \right\}_{\text{доп}} \quad (9)$$

де $\log \{ q[\Delta N(t=0)] \} = 50,95dB$ — початковий рівень РБП при $t = 0$ і відсутності відмов ППК в АФАР (на 6400 ППК).

Розв'язавши рівняння (9) визначається відносний середній наробіток до відмови АФАР $\frac{T_{0_АФАР}}{T_{0_ППК}}$.

Приклад 1

Визначити залежність середнього напрацювання до відмови і РБП від відносної кількості відмов ППК для АФАР на 6400 ППК

Вихідні дані для досліджуваної АФАР:

- $N_0 = 6400 \text{ ППК};$
- $T_{0_ППК} = 50 \text{ 000 ч.};$
- $T_{0_ППМП} = 250 \text{ 000 ч.};$
- $T_{0_МВП} = 250 \text{ 000 ч.}$

Використовуючи формулу (8) отримаємо експоненціальну залежність для відносної кількості відмов ППК досліджуваної АФАР:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = 1 - \exp \left[-\frac{t}{5 \times 10^4} (1 + 0,2 + 0,4) \right] = 1 - \exp \left[-\frac{t}{3,125 \times 10^4} \right] \quad (10)$$

На рис. 5 представлені графіки залежності погіршення логарифма РБП

$$\log \left\{ q \left[\frac{\Delta N}{N_0} (T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК}) \right] \right\}$$

та відносного середнього наробітку до відмови приймально-передавальної АФАР

$$T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК}$$

від відносної кількості відмов ППК $\frac{\Delta N}{N_0}$.

Для побудови математичної моделі надійності приймально-передавальної АФАР з дворівневою схемою надійності вводяться поняття: допустимої кількості відмов ППК у підрешітці — m_g і допустимої кількості умовних відмов підрешіток m_S [13].

Примітка 1: Під умовно відмовившою підрешіткою розуміється підрешітка, у якій відмовили $m_g + 1$ випромінювачів. В умовно відмовившій підрешітці є відмовившими тільки $m_g + 1$ ППК, інші ППК є працездатними і забезпечують функціонування АФАР.

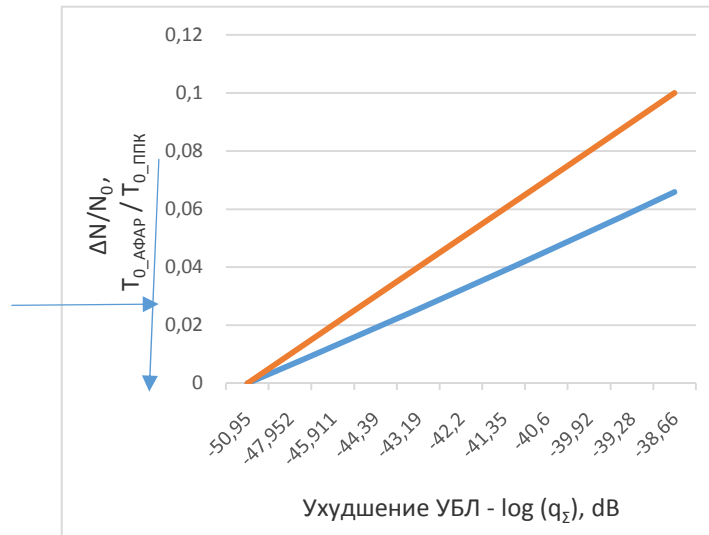


Рис. 5. Графік залежності погіршення РБП $-\log(q_z)$ і відносного середнього наробітку до відмови АФАР — $T_{0_АФАР_1} / T_{0_ППК}$ (синя лінія) від відносної кількості відмов ППК — $\Delta N/N_0$ (червона лінія)

Для визначення імовірності безвідмовної роботи АФАР з дворівневою ССН використовується класична формула для резервованої невідновлювальної структури зі змінним резервом [13; 14]:

$$P_{АФАР}(t) = \sum_{j=0}^{m_S} C_{S_0}^j [P_{ППДР}(t)P_{МВП}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-j} [1 - P_{ППДР}(t)P_{МВП}(t)P_{ППМП}(t)]^j, \quad (11)$$

де $P_{АФАР}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи антенної підreshітки; $Q_{ППДР}(t) = 1 - P_{ППДР}(t)$ — імовірність умовної відмови антенної підreshітки;

$$S_1 = 43,37; S_2 = 221,6; S_3 = 995;$$

$$P_{ПОДР}(t) = \sum_{i=0}^{m_G} C_{G_0}^i [P_{ППК}(t)P_{МВП}(t)]^{G_0-i} [1 - P_{ППК}(t)P_{МВП}(t)]^i; \quad (12)$$

де $P_{ППК}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи ППК, $Q_{ППК}(t) = 1 - P_{ППК}(t)$ — імовірність відмови ППК; $P_{МВП}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи модуля ВИП; m_G — допустима кількість умовних відмов підreshіток в АФАР; G_0 — загальна кількість ППК у підreshітці; m_S — допустима кількість умовних відмов підreshіток в АФАР; S_0 — загальна кількість підreshіток в АФАР.

Щільність розподілу ймовірності безвідмовної роботи антенної підreshітки визначається за формулою:

$$f_{підр}(t) = (G_0 - m_G) C_{G_0}^{m_G} [1 - P_{ППК}(t)P_{МВП}(t)]^{m_G} \times [P_{ППК}(t)P_{МВП}(t)]^{G_0-m_G-1} f(t), \quad (13)$$

безвідмовної роботи АФАР визначається за формулою:

$$f_{АФАР}(t) = -\frac{dP_{АФАР}(t)}{dt},$$

$$f_{АФАР}(t) = (S_0 - m_S) C_{S_0}^{m_S} [1 - P_{ППДР}(t)P_{МВП}(t)P_{ППМП}(t)]^{m_S} \times [P_{ППДР}(t)P_{МВП}(t)P_{ППМП}(t)]^{S_0-m_S-1} f_{ППДР}(t). \quad (14)$$

Інтенсивність відмов АФАР визначається за формулою:

$$\Lambda_{АФАР}(t) = \frac{f_{АФАР}(t)}{P_{АФАР}(t)}. \quad (15)$$

Гама-процентний ресурс АФАР $-T_{\gamma_АФАР}$ визначається із вирішення рівняння:

$$P_{АФАР}(t = T_{\gamma_АФАР}) = \gamma_{АФАР}. \quad (16)$$

Для визначення допустимого числа умовних відмов підreshіток в АФАР необхідно скласти і вирішити трансцендентне рівняння щодо m_S для середнього наробітку до відмови:

$$T_{0_АФАР_2} \geq T_{0_АФАР_1} \quad (17)$$

$$P_{МВП}(t = T_{0_АФАР_2})P_{ППМП}(t = T_{0_АФАР_2}) \times P_{ППДР}(t = T_{0_АФАР_2}) = 1 - \frac{m_S}{S_0} - \frac{1}{S_0}. \quad (18)$$

Імовірність безвідмовної роботи антенної підрешітки у рівнянні (18) визначається за допустимої кількості відмов ППК (МВП)

$$m_G = \frac{\Delta N}{N_0} G_0.$$

Отже, визначивши раніше $T_{0_АФАР_1}$ з рівняння (9), знаходимо значення $T_{0_АФАР_2}$ з рівняння (18) (з урахуванням виконання умови (17)) і визначаємо допустиму кількість умовних відмов підрешіток — m_S з допустимим числом відмов ППК — m_G у кожній підрешітці.

На підставі певних значень m_G і m_S надалі визначаються ймовірні показники надійності АФАР.

Приклад 2

Визначити середній наробіток до відмови, РБП і відносну кількість відмов ППК для різних значень допустимої кількості відмов у антенній підрешітці — m_G і допустимої кількості умовних відмов підрешіток — m_S для АФАР на 6400 ППК.

Вихідні дані ті самі, що і для прикладу 1.

Вирішення рівняння (9) при допустимому рівні РБП, рівному — 47,95 dB, відповідає відносному середньому наробітку до відмови АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_1}}{T_{0_ППК}} = 0,0062865; (\Delta N / N_0)_1 = 0,01001;$$

$$T_{0_АФАР_1} = 0,0062825 \times T_{0_ППК} = 0,0062825 \times 50000 = 314 \text{ год.}$$

Розв’язання рівняння (18) при $m_G = 5$, $m_S = 5$ відповідає відносному середньому наробітку до відмови АФАР:

$$\frac{T_{0_АФАР_2}}{T_{0_ППК}} = 0,003483$$

(РБП – 41,83 dB, погіршення РБП на 9,12 dB)

$$T_{0_АФАР_2} = 0,03483 \times 50000 = 1741,5 \text{ год}$$

$$i \Delta N / N_0 \left(\frac{T_{0_АФАР_2}}{T_{0_ППК}} = 0,003483 \right) = 0,0542,$$

$\Delta N = 347$ ППК, що відповідає наступному розподілу відмов ППК в антенних підрешітках:

$$N = (5+1)(5+1) + 5*21 + 4*24 + 3*20 + 2*21 + 1*8 = 347 \text{ ППК,}$$

$$S = 6 + 21 + 24 + 20 + 21 + 8 = 100 \text{ підрешіток}$$

У таблиці представлено розв’язання трансцендентного рівняння (18) для визначення ймовірності безвідмовної роботи приймально-передавальної АФАР у приймальному режимі під час різних значень допустимого числа відмов ППК у антенній — m_g і допустимої кількості умовних відмов антенних підрешіток в АФАР — m_S .

На рис. 7 представлені графіки ймовірності безвідмовної роботи приймально-передавальної АФАР у приймальному режимі.

З графіків на рис 7 видно, що зі збільшенням кількості умовних відмов підрешіток криві для ймовірності безвідмовної роботи все ближче наближаються до нормального розподілу.

Висновки

Запропоновані авторами математичні моделі надійності АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток і за критерієм допустимого зниження максимальної дальності спільно складають узагальнену фізико-математичну модель надійності приймально-передавальної АФАР багатofункціональної РЛС.

Представлена в роботі поліноміальна модель залежності РБП від відносної кількості відмовили випромінювальних каналів може бути використана для побудови моделі надійності приймальної АФАР і напівактивної ФАР.

У роботі досліджувалася математична модель надійності АФАР при раптових відмовах каналів і модулів. Надалі доцільно провести дослідження показників надійності АФАР за критерієм допустимого погіршення РБП при спільному прояві раптових і поступових відмов.

Таблиця

Результати вирішення завдання 1 і 2

$\frac{\log(q_\Sigma)}{\Delta \log(q_\Sigma)}$	$(\Delta N / N_0)_1$	$\left(\frac{T_{0_АФАР}}{T_{0_ППК}} \right)_1$	m_G	m_S	$[\log(q_\Sigma)]_2$	$(\Delta N / N_0)_2$	$\left(\frac{T_{0_АФАР}}{T_{0_ППК}} \right)_2$
- 47,952/3,0	0,01001	0,00629	2	1	- 47,65	0,0113	0,00708
- 44,952/6,0	0,02600	0,01646	4	4	- 44,75	0,0274	0,01737
- 41,952/9,0	0,05279	0,03390	5	5	- 41,83	0,0542	0,03483
- 38,952/12,0	0,09528	0,06258	7	11	- 38,85	0,0970	0,06377
- 35,952/15,0	0,14406	0,09722	10	12	- 35,85	0,1457	0,09839
- 32,952/18,0	0,18816	0,13028	19	22	- 32,80	0,1903	0,13194

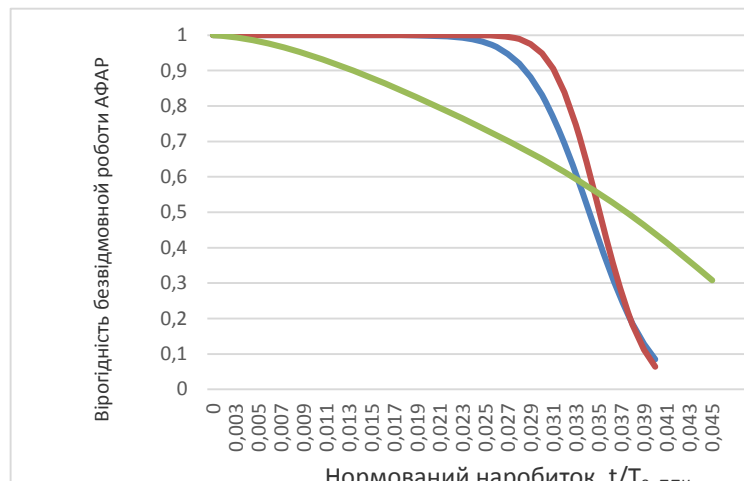


Рис. 6. Графіки ймовірності безвідмовної роботи приймально-передавальної АФАР

$P_{AFAR} \left(\frac{t}{T_{0_ППК}} \right)$ за будь-якої кількості відмовивших ППК в умовах відмов антенних підрешіток

при погіршенні РБП ДС на 9 dB (із значення — 50,95 dB до значення — 41,95 dB):
 графік фіолетового кольору — при $m_G = 8, m_S = 1$; графік синього кольору — при $m_G = 5, m_S = 5$;
 графік червоного кольору — при $m_G = 4, m_S = 13$

Розроблені авторами методи розрахунку показників надійності АФАР можуть бути корисні інженерам і вченим-розробникам РЛС, а також в навчальному процесі.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Крылов Е.** Перспективы развития радиолокационных станций вооружённых сил иностранных государств. *Зарубежное военное обозрение*. 2018. №2. С. 37–40.
2. **Ashok K. Agrawal** Active Phased Array Design for High Reliability. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 1999. Vol. 35. NO. 4. Pp. 1204–1211.
3. **Ashok K. Agrawal.** Beamformer Architectures for Active Phased-Array Radar Antennas. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. Vol. 47. No. 3. March 1999. Pp. 432–442.
4. **Ashok K. Agrawal.** Active Phased Array Antenna Development for Modern Shipboard Radar Systems. *Active phased array antenna development johns hopkins apl technical direct*. 2001. Volume 22. Number 4. Pp. 600–612.
5. **Kostanovskii V. V.** A mathematical model for calculating the reliability of nonreducible phased antenna arrays. *Measurement Techniques*. 2014. Т. 57. № 1. Pp. 87–90.
6. **Костановский В. В.,** Козачук О. Д. Вероятностный анализ безотказности и долговечности апертур фазированных антенных решеток в процессе проектирования. *Математичні машини і системи*. 2015. №3. С. 201–213.
7. **Костановський В. В.** Математичні моделі надійності типових апертур фазованих антенних решіток, які враховують раптови та поступові відмови модулів надвисоких частот. *Математичні машини і системи*. 2014 р. № 2. С. 142–150.
8. **Kostanovsky V.,** Machalin I., Kozachuk O., Terentyeva I. Construction of a generalized probabilistic-physical model of reliability of two-level active phased antenna array. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 3/9 (99). С. 31–40. ISSN 1729-3774. DOI:10.15587/17289-061/2019/168525
9. **Костановський В. В.** Визначення області існування показників надійності залежно від допустимих значень показників ефективності активної фазованої антенної решітки. *Математичні машини і системи*. 2019. № 4. С. 154–164.
10. **Костановський В. В.,** Демченко О. В., Козачук О. Д. Модель розрахунку показників надійності АФАР за критерієм допустимого зниження максимальної дальності РЛС // *Наукоємні технології*. 2020. Том 45. №1. С. 3–10. DOI: 10.18372/2310-5461.45.14577
11. **Костановский В. В.,** Мачалин И. А. Универсальная модель надежности активной фазированной антенной решетки многофункциональной РЛС // *Водный транспорт*. 2020. №1.
12. **Хансен Р. С.** Фазированные антенные решетки / пер. с английского: под ред. А. И. Синани. М.: Техносфера, 2012.
13. **Антенны** и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. Радиосвязь, Москва, 1994.

Костановський В. В., Козачук О. Д., Мачалін І. О.
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ АФАР У ПРИЙМАЛЬНОМУ РЕЖИМІ ЗА КРИТЕРІЄМ ДОПУСТИМОГО ПОГІРШЕННЯ РІВНЯ БОКОВИХ ПЕЛЮСТОК

Математична модель надійності приймально-передавальної АФАР в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток

У статті розглядається математична модель надійності активних фазованих антенних решіток (АФАР) багатофункціональних РЛС в приймальному режимі за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток. Для визначення рівня бічних пелюсток (квантування фазообертачів) плоскою АФАР при рівномірному амплітудному розподілі використана формула, запропонована проф. Р.С. Хансеном у роботі «Фазовані антенні решітки». З використанням даної формули представлені графіки залежностей логарифма середньоквадратичного значення (с.к.з.) рівня бічних пелюсток, обумовлене випадковою похибкою квантування фази від кількості випромінюючих елементів в АФАР, залежно від логарифма кількості випромінюючих елементів в АФАР. Для побудови моделі надійності АФАР використовується поліноміальна апроксимація рівня бічних пелюсток від відносного рівня кількості відмовили приймально-передавальних каналів. В роботі побудовано дворівневу структурну схему надійності АФАР і трансцендентне рівняння, рішення якого дозволяє визначити середній наробіток до відмови АФАР за критерієм допустимого погіршення рівня бічних пелюсток. Представлені формули для визначення імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов і інтенсивності відмов АФАР в приймальному режимі. Розглянуто ілюстративний приклад розрахунку показників надійності плоскої АФАР в приймальному режимі на 6400 приймально-передавальних каналів.

Представлені в статті результати можуть бути використані вченими і інженерами-розробниками при проектуванні багатофункціональних РЛС з АФАР, а також в навчальному процесі.

Ключові слова: активна фазована антенна решітка; рівень бічних пелюсток; приймально-передавальні канали; фазообертачі.

Kostanovskiy V., Kozachuk O., Machalin I.
MATHEMATICAL MODEL OF THE RELIABILITY TRANSCIVING APAR IN THE RECEIVING MODE ACCORDING TO THE CRITERION OF PERMISSIBLE DEGRADATION OF THE SIDE LOBE LEVEL

The article discusses a mathematical model of the reliability of APAR of multifunctional radars in the receiving mode according to the criterion of permissible deterioration of the side lobe level. To determine the level of the side lobes (quantization of phase shifters) of a flat APAR with a uniform amplitude distribution, the formula proposed by prof. R.S. Hansen in Phased Antenna Arrays. Using this formula, the graphs of the dependences of the logarithm of the root mean square value (rms) of the side lobe level due to the random phase quantization error on the number of emitting elements in the APAR, depending on the logarithm of the number of emitting elements in the APAR, are presented. A polynomial approximation of the side-lobe level from the relative level of the number of failed transmit-receive channels is used to construct a reliability model for APAR. In this work, a two-level structural diagram of the APAR reliability and a transcendental equation are constructed, the solution of which allows us to determine the mean time to failure of the AESA by the criterion of the permissible deterioration of the side lobe level. Formulas are presented for determining the probability of failure-free operation, the density of the distribution of failures and the failure rate of the APAR in the receiving mode. An illustrative example of calculating the reliability indices of a flat APAR in the receiving mode for 6400 transmitting and receiving channels is considered.

The results presented in the article can be used by scientists and development engineers in the design of multifunctional radars with AFAR, as well as in the educational process.

Keywords: active phased antenna array; side lobe level; transmit-receive channels; phase shifters.

Костановский В. В., Козачук О. Д., Мачалин И. А.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АФАР МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС В ПРИЁМНОМ РЕЖИМЕ ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО УХУДШЕНИЯ УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ

В статье рассматривается математическая модель надёжности активных фазированных антенных решёток (АФАР) многофункциональных РЛС в приёмном режиме по критерию допустимого ухудшения уровня боковых лепестков. Для определения уровня боковых лепестков (квантования фазовращателей) плоской АФАР при равномерном амплитудном распределении использована формула, предложенная проф. Р.С. Хансеном в работе «Фазированные антенные решётки». С использованием данной формулы представлены графики зависимостей логарифма среднеквадратичного значения (с.к.з.) уровня боковых лепестков, обусловленное

случайной погрешностью квантования фазы от количества излучающих элементов в АФАР, в зависимости от логарифма количества излучающих элементов в АФАР. Для построения модели надёжности АФАР используется полиномиальная аппроксимация уровня боковых лепестков от относительного уровня количества отказавших приёмно-передающих каналов. В работе построена двухуровневая структурная схема надёжности АФАР и трансцендентное уравнение, решение которого позволяет определить среднюю наработку до отказа АФАР по критерию допустимого ухудшения уровня боковых лепестков. Представлены формулы для определения вероятности безотказной работы, плотности распределения отказов и интенсивности отказов АФАР в приёмном режиме. Рассмотрен иллюстративный пример расчёта показателей надёжности плоской АФАР в приемном режиме на 6400 приёмно-передающих каналов.

Представленные в статье результаты могут быть использованы учёными и инженерами-разработчиками при проектировании многофункциональных РЛС с АФАР, а также в учебном процессе.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка; уровень боковых лепестков; приемно-передающие канал; фазовращатели.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2020 р.

Прийнято до друку 25.09.2020 р.