
УДК 621.396.96

В.Й. Климченко¹, Г.Г. Камалтинов¹, О.В. Белавін²

¹Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ ДЛЯ ЗНЯТТЯ ДІАГРАМ НАПРАВЛЕНОСТІ АНТЕН СУЧАСНИХ РЛС РОЗВІДКИ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

Розглядаються можливості використання в процесі полігонних випробувань сучасних РЛС РТВ відомого методу вимірювання діаграм направленості антен з використанням радіочастотного випромінювання Сонця.

Аналізуються теоретичні можливості методу і умови, за яких його застосування є прийнятним. Окреслюється коло практичних обмежень щодо доцільності використання означеного методу. Розглядається вплив рельєфу та електромагнітної обстановки в межах України на практичне використання методу вимірювання діаграм направленості антен з використанням радіочастотного випромінювання Сонця.

Ключові слова: діаграма направленості антени, вимірювання, радіочастотне випромінювання Сонця, енергетичний приймач.

Вступ

Постановка завдання. Для вимірювання діаграм направленості антени (ДНА) необхідне автономне джерело з певною потужністю радіовипромінювання, встановлене в дальній зоні, радіус $R_{дз}$ якої залежить [1] від розмірів антен d_1 , d_2 та довжини λ хвиль електромагнітних коливань

$$R_{дз}=2(d_1+d_2)2/\lambda, \quad (1)$$

де d_1 , d_2 – більший із розмірів вимірюваної та вимірювальної антен, і може становити величину від кількох сотень метрів до кількох кілометрів.

При вимірюванні ДНА в горизонтальній площині таке штучне джерело достатньо розташувати в дальній зоні на поверхні землі. А при вимірюванні ДНА у вертикальній площині джерело необхідно переміщувати в секторі кутів місця від 0° до $30\dots45^\circ$, тобто до висот в кілька кілометрів, що робить використання автономного джерела випромінювання для зняття ДНА у вертикальній площині практично неможливим.

В 50 – 60-х роках був розроблений і використовувався на практиці метод вимірювання ДНА у вертикальній площині "по Сонцю" для РЛС П-14, 5Н84

і 5Н84А. Дійсно в разі використання замість штучного джерела радіовипромінювання природного, яким є Сонце, проблеми з переміщенням джерела у вертикальній площині не існує. Але Сонце є досить специфічним джерелом випромінювання, і його використання для вимірювання ДНА можливе лише за певних умов. Практика довела невисоку ефективність цього методу, головним чином через апаратну недосконалість і обмежені можливості тогочасної елементної бази. Тому в подальших розробках і "метрових" РЛС, і РЛС інших діапазонів означений метод не набув поширення. Але з тих пір значно змінилися і апаратні можливості, і вимоги до РЛС, і умови їхньої роботи. Незмінним залишився хіба що природний процес сонячного випромінювання. Саме через це й виникла потреба з оглядом на сучасні умови розглянути можливості і доцільність використання відомого методу в процесі випробування нових радіолокаційних станцій метрового та дециметрового діапазонів хвиль з урахуванням усіх факторів впливу.

Характеристика Сонця як джерела радіовипромінювання

Кутові розміри сонячного диску становлять 30'. Це перший обмежувальний фактор. Джерело випромінювання має бути точковим, тобто його кутові розміри мають бути хоча б в 10...20 разів меншими, ніж ширина вимірюваної ДНА. Отже, Сонце можна вважати точковим джерелом випромінювання лише для тих РЛС, ширина ДНА в яких в вертикальній площині не менше 5...10 градусів.

Рівень випромінювання Сонця, як свідчать радіоастрономічні виміри, на протязі декількох годин

залишається постійним. Це є позитивним фактором, який дозволяє впевнено проводити дво-тригодинні вимірювання доки Сонце не підніметься по небосхилу на 30...40°.

Подальші вимірювання не мають сенсу, оскільки ширина ДНА в вертикальній площині в оглядових РЛС не перевершує цих значень.

Для вимірювання ДНА важливо знати наскільки потужним є радіовипромінювання Сонця і наскільки воно перевершує потужність власних шумів приймального тракту тієї чи іншої РЛС. Від цього залежить методика проведення вимірювань.

Спектральну щільність потужності радіовипромінювання Сонця на вході приймального тракту можна розрахувати за формулою

$$N_c = S_c A_{\text{эф}} L_{\text{втр}} = S_c \frac{\lambda^2}{4\pi} G \cdot L_{\text{втр}}, \quad (2)$$

де S_c – спектральна щільність потоку потужності радіовипромінювання Сонця, Вт/м²·Гц; $A_{\text{эф}}$ – ефективне значення площі антени, м²;

λ – довжина хвилі, м; G – коефіцієнт підсилення антени;

$L_{\text{втр}}$ – коефіцієнт втрат сигналів в фідерному тракті.

Графік спектральної щільності потоку сонячного випромінювання S_c [2] наведений на рис. 1.

В діапазоні роботи РЛС метрового діапазону спектральна щільність потоку потужності радіовипромінювання «спокійного» Сонця (при відсутності магнітних бурь) становить величину $S_c \cong 5 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²·Гц, а в дециметровому діапазоні $S_c \cong 3 \cdot 10^{-21}$ Вт/м²·Гц.

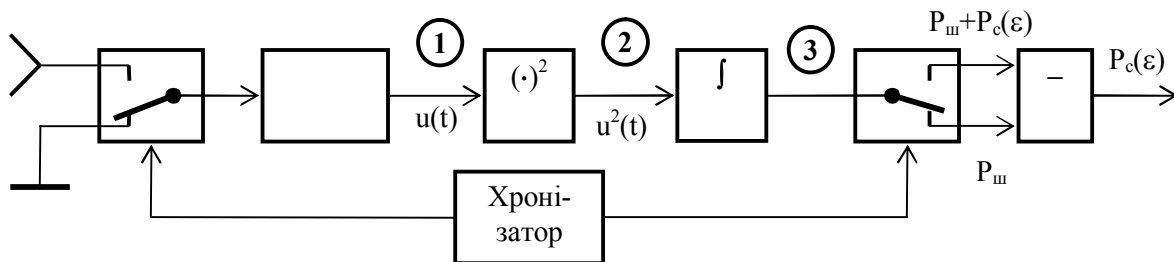


Рис. 1. Структурна схема вимірювача ДНА "по Сонцю" на основі енергетичного приймача

Характеристика шумових властивостей приймальних трактів РЛС

Спектральна щільність потужності власних шумів приймального тракту визначається співвідношенням [3]

$$N_0 = k \cdot T_0 \cdot (\text{Ш} + \gamma_a - 1), \quad (3, a)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – стала Больцмана;

$T_0 = 290^\circ\text{K}$ – стандартна шумова температура в радусах Кельвіна;

Ш – коефіцієнт шуму приймального пристрою;

$\gamma_a = T_0/T_a$ – відносна шумова температура антени (T_a – абсолютна температура антени в градусах Кельвіна).

Для наземних РЛС, розташованих в кліматичній зоні України, T_a може змінюватися від 250 до 300°K і $\gamma_a \cong 1$.

Тому спектральна щільність потужності власних шумів приймального тракту таких РЛС може бути виражена спрощеним співвідношенням

$$N_0 = k \cdot T_0 \cdot \text{Ш}. \quad (3, б)$$

В табл. 1 наведені основні параметри РЛС метрово-го та дециметрового діапазонів, які впливають на результати вимірювань ДНА по Сонцю, і розраховані

за співвідношеннями (2), (3) значення спектральної щільності власних шумів і шумів Сонця.

Таблиця 1

Основні параметри приймальних трактів РЛС МР-1, ДР-1

Пара-метр/тип РЛС	λ	G	Ширина променю у верт. площині	Кіль-кість парц. променів	Ширина променю у гориз. площині	Ш	$L_{втр}$, дБ	N_0 , Дж	N_c , Дж	$\frac{N_c}{N_0}$
Метрового діапазону	1,8 м	130 50	$\Delta\varepsilon_1=12^\circ$ $\Delta\varepsilon_4=15^\circ$	4	$\Delta\beta_1=6^\circ$ $\Delta\beta_4=15^\circ$	2	2	$0,8 \cdot 10^{-20}$	$1,3 \cdot 10^{-20}$ $0,6 \cdot 10^{-20}$	2 1,3
Метрового діапазону	23 см	2000 850	$\Delta\varepsilon_1=2,7^\circ$ $\Delta\varepsilon_{10}=6^\circ$	10	$\Delta\beta=2,5^\circ$	2	2	$0,8 \cdot 10^{-20}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$ $0,68 \cdot 10^{-20}$	2 0,85

Із наведених в табл. 1 розрахунків випливає, що спектральна щільність потужності радіовипромінювання Сонця на входах приймальних трактів РЛС перевищує не більше ніж вдвічі спектральну щільність перерахованої на входи потужності власних шумів трактів. Таке ж співвідношення між потужностями власних шумів і шумів Сонця буде і на виходах приймальних трактів, де, власне, і має проводитись вимірювання.

Це означає, що шуми Сонця досить слабкі і суттєво не впливають на роботу РЛС. Але при вимірюванні ДНА цей взагалі позитивний чинник переходить у свою протилежність і стає негативним, оскільки при такому відношенні "сигнал/шум" не те, що виміряти параметри сигналу, а й виявити його неможливо без вжиття спеціальних заходів.

Енергетичний приймач, як вимірювач потужності шумів

Теоретично за умови стаціонарності рівня власних шумів вимірювання потужності як завгодно малопотужного зовнішнього джерела шумових коливань можливе через використання енергетичного приймача [4], структурна схема якого наведена на рис. 2. Основними операціями енергетичного приймача є квадратичне детектування і накопичення сигналів. Якщо означені операції здійснювати при відкритому і закритому вході приймача, то при виборі відповідного часу накопичення (інтегрування) можна визначити рівень перевищення потужності зовнішнього джерела над власними шумами з будь-якою точністю.

Дійсно, якщо миттєве значення власних шумів приймального тракту $u_{ш}(t)$ розподілене (рис. 3, а) за нормальним законом з

$$\sigma_{ш} = \sqrt{N_0 \Delta F}, \quad (4)$$

де ΔF – ширина смуги пропускання тракту, то після квадратичного детектування процес $u_{ш}^2(t)$ буде роз-

поділений [5] за законом Релея з математичним сподіванням

$$P_{ш} = 1,25 \sigma_{ш}^2 \quad (5)$$

і середньоквадратичним відхиленням (рис. 3, б)

$$\sigma_{P_{ш}} = 0,655 \sigma_{ш}^2. \quad (6)$$

Аналогічно буде розподілена і суміш власних шумів і випромінювання Сонця з

$$\sigma_{шс} = \sqrt{N_0 \Delta F + S_c \Delta F} \quad (7)$$

до квадратичного детектування і з

$$P_{шс} = 1,25 \sigma_{шс}^2; \quad (8)$$

$$\sigma_{P_{шс}} = 0,655 \sigma_{шс}^2 \quad (9)$$

після (рис. 3, б).

В результаті N-кратного накопичення результату після квадратичного детектування процес при $N \gg 1$ нормалізується у відповідності з центральною граничною теоремою і його математичне сподівання за відсутності і за наявності сонячного випромінювання буде визначатись співвідношеннями

$$P_{ш} = N \cdot 1,25 \sigma_{ш}^2; \quad (10)$$

$$P_{шс} = N \cdot 1,25 \sigma_{шс}^2 \quad (11)$$

відповідно, а середньоквадратичне відхилення (рис. 3, в)

$$\sigma_{P_{ш\Sigma}} = \frac{0,655 \sigma_{ш}^2}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

$$\sigma_{P_{шс\Sigma}} = \frac{0,655 \sigma_{шс}^2}{\sqrt{N}}. \quad (13)$$

Вимірюючи на виході приймального тракту різницю $P_{шс} - P_{ш}$, яка створюється радіовипромінюванням Сонця, та знаючи кутове положення Сонця, можна визначити діаграму направленості антени в вертикальній площині:

$$P_c(\varepsilon) = P_{шс}(\varepsilon) - P_{ш}(\varepsilon) = k \cdot f(\varepsilon), \quad (14)$$

де k – коефіцієнт розмірності.

Вимірювання проводяться при сході або при заході Сонця в залежності від того, який з напрямків ближче до відповідального сектору РЛС або має більш близький рельєф до рельєфу відповідального сектору.

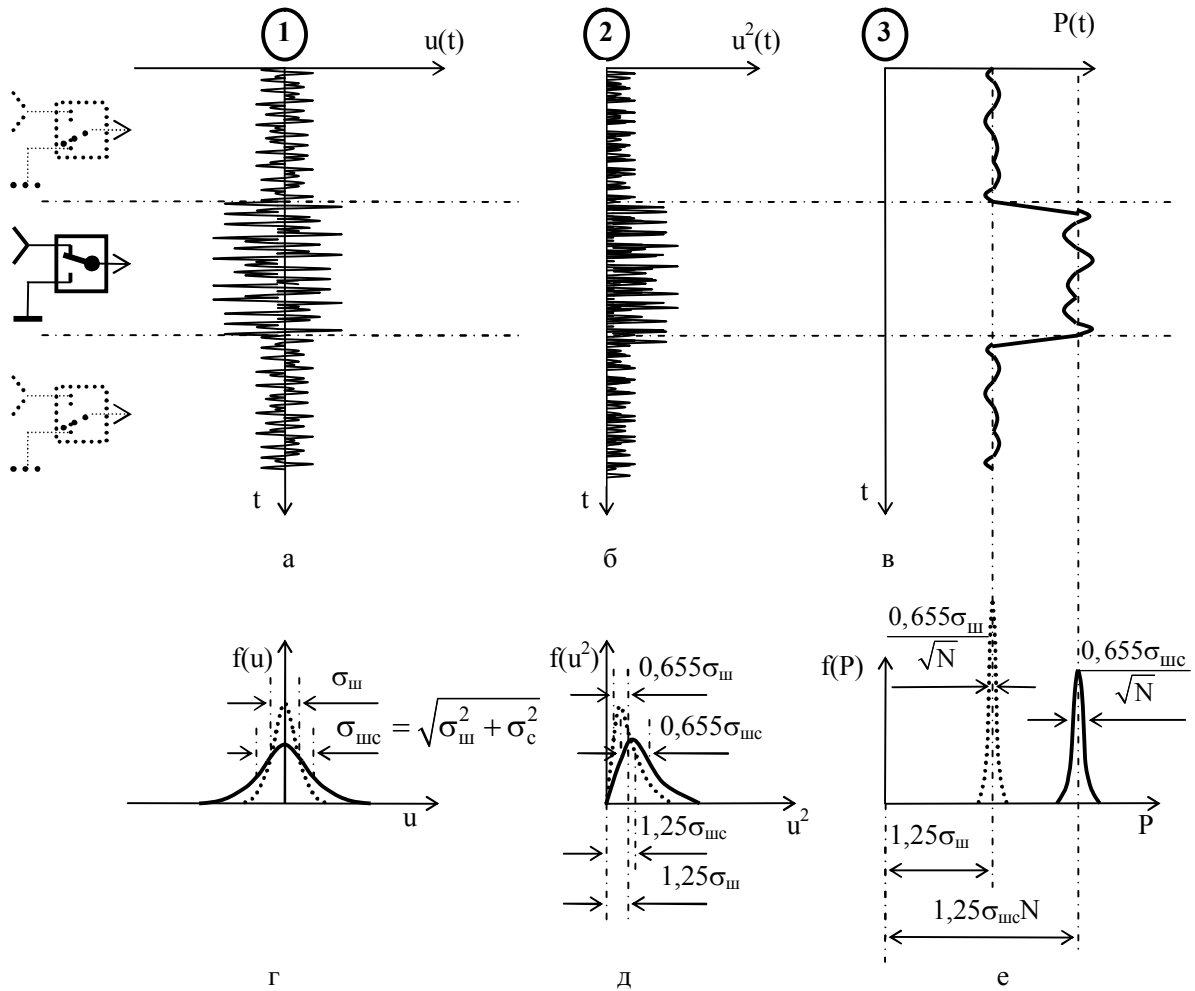


Рис. 2. Епюри напруг (а, б, в) та густина розподілу ймовірності їхніх миттєвих значень (г, д, е) в різних точках енергетичного приймача

Кратність накопичення вибирається, виходячи із необхідної точності вимірювання потужності зовнішніх шумів

$$N = \frac{T_{\text{інт}}}{\tau_k}, \quad (15)$$

де $T_{\text{інт}}$ – час накопичення (інтегрування);
 $\tau_k = 1/\Delta F$ – інтервал кореляції процесу на виході приймального тракту.

При вимірюванні ДНА необхідно забезпечити таку точність вимірювання потужності випромінювання Сонця, при якій би вірогідна похибка вимірювання не перевищувала хоча б рівень бічних пелюсток. Це означає, що має виконуватись нерівність

$$\frac{3 \cdot \sigma_{\text{шс}\Sigma}}{P_c(\epsilon_{\text{макс}})} \leq 10^{\frac{G_6}{10}}, \quad (6)$$

де G_6 – рівень бічних пелюсток в децибелах;
 $\epsilon_{\text{макс}}$ – кут місця, при якому виміряна потужність випромінювання Сонця є максимальною.

З урахуванням (7), (10), (11), (13) залежність між кратністю накопичення і точністю вимірювань набуде такого вигляду

$$N \geq \sqrt[3]{\left(\frac{1,572 \sqrt{1 + \frac{S_c}{N_0}}}{10^{\frac{G_6}{10}} \left(\sqrt{1 + \frac{S_c}{N_0}} - 1 \right)} \right)^2}. \quad (17)$$

При рівні бічних пелюсток мінус 30 дБ і відношенні $\frac{S_c}{N_0} = 2$ кратність накопичення має бути не менше 200. Це означає, що при смузі пропускання приймача 300...500 кГц час накопичення не буде перевищувати 600...800 мкс, що є цілком прийнятним для оглядових РЛС.

Можливості практичного вимірювання ДНА "по Сонцю"

При аналізі практичних можливостей щодо реалізації в РЛС вимірювання ДНА "по Сонцю" необхідно виходити не тільки з теоретичних засновок, а й з реальних умов проведення таких вимірювань.

Щодо теоретичних засновок, викладених раніше, то Сонце, як зовнішнє джерело випромінюван-

ня, може бути використане для вимірювання ДНА тільки в РЛС метрового діапазону, для якої воно при ширині ДНА у вертикальній площині біля 10° може умовно вважатися точковим джерелом. В РЛС дециметрового діапазону при кутомісцевій ширині променів у $2 - 3^\circ$ (табл. 1) використання Сонця, як зовнішнього джерела випромінювання для зняття ДНА, є нереальним. Але теоретичні можливості такого використання зводяться нанівець через низку обставин практичного характеру.

По-перше, для вимірювання ДНА "по Сонцю" станція повинна мати відповідний вимірювальний канал у складі енергетичного приймача і відповідних комутуючих пристроїв та необхідне алгоритмічне і програмне забезпечення вимірювань. Ні того, ні другого в РЛС немає і в ТГЗ такі функції не закладаються.

По-друге, електромагнітна обстановка в частотному діапазоні роботи РЛС метрового діапазону на території України через густу телевізійну та зв'язкову мережу настільки складна і мінлива, що означені вимірювання втрачають сенс. На рис. 4 наведений вигляд екрану ІКО РЛС 5Н84АМА (позиція в районі м. Васильків), яка працює в метровому діапазоні і має вбудований вимірювач рівня зов-

нішніх завад [6]. На екрані в процесі формування кругової розгортки відображається спеціальна лінія. Рівню власних шумів відповідає положення лінії на периферії екрану (на відстані 500 км). Зі збільшенням рівня завад лінія наближається до центра екрану. Вимірювач рівня завад відкалібрований так, що наближення лінії на 5 км відповідає перевищенню зовнішніх шумів над власними на 1 дБ. Аналіз рисунків свідчить, що рівень зовнішніх завад і в нижній, і в середній, і в верхній частинах частотного діапазону перевищує власні шуми в середньому на 10...20 дБ, тоді як потужність випромінювання Сонця перевищує потужність власних шумів всього лише вдвічі, тобто на 3 дБ (табл. 1). Більше того, електромагнітна обстановка постійно змінюється не тільки у просторі, а й у часі. Така електромагнітна обстановка є характерною не тільки для позиції в районі м. Васильків, а й для позицій в будь-якому регіоні України. Про це свідчить досвід використання РЛС 55Ж6 та 1Л13, які в 90-х роках були розгорнуті по всій території України і які мали аналогічну апаратуру для вимірювання рівня зовнішніх завад.

Цілком очевидно, що використовувати слабке випромінювання Сонця для вимірювання ДНА в таких умовах абсолютно неможливо.

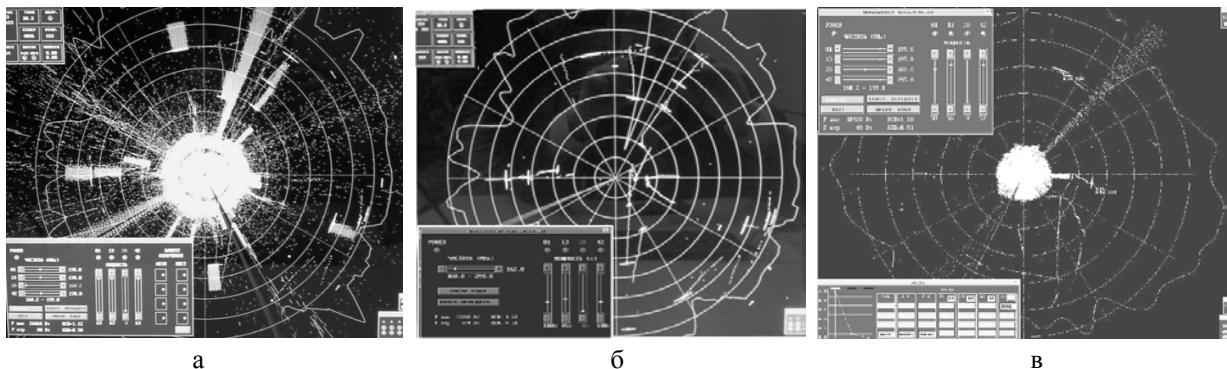


Рис. 3. Рівні зовнішнього випромінювання в діапазоні роботи РЛС 5Н84АМА:

а – в нижній частині діапазону; б – в середній частині діапазону; в – в верхній частині діапазону

По-третє, використовувати Сонце, як джерело випромінювання, для зняття ДНА в РЛС метрового діапазону хвиль має сенс лише в умовах рівнинних місцевостей, характерних для випробувального полігону Капустин Яр, де й був започаткований цей метод. В умовах середньопересіченої місцевості, яка є характерною для переважної території України, результати вимірювань будуть сильно залежати від характеру місцевості в 30.40-градусних східних і західних секторах позицій, де розгорнуті РЛС.

Таким чином, враховуючи теоретично потенційні можливості методу вимірювання ДНА "по Сонцю" і реальні фактори впливу на процес вимірювання, можна констатувати, що застосування означеного методу для випробувань РЛС є недоцільним.

Висновки

1. Однією з основних проблем при вимірюванні діаграм направленості у вертикальній площині антен РЛС, розташованих на реальних позиціях, є необхідність переміщення встановленого в дальній зоні джерела випромінювання в секторі кутів місця від 0° до $30...45^\circ$, тобто до висот в кілька кілометрів, що робить використання автономного джерела випромінювання для зняття ДНА у вертикальній площині практично неможливим.

2. Відомий ще з 50-х років метод вимірювання ДНА з використанням замість штучного джерела радіовипромінювання природного, яким є Сонце, не набув поширення частково через специфічність дже-

рела і головним чином, як вважалося, через апаратурну недосконалість та обмежені можливості тогочасної елементної бази.

3. Кутові розміри сонячного диску становлять $0,5^\circ$. Через це Сонце, як джерело радіочастотного випромінювання, можна вважати точковим лише для РЛС метрового діапазону, для якої ширина ДНА у вертикальній площині становить $12 - 15^\circ$.

4. Шуми Сонця досить слабкі і спектральна щільність потужності радіовипромінювання Сонця на входах приймальних трактів РЛС перевищує не більше ніж вдвічі спектральну щільність перерахованої на входи потужності власних шумів трактів. Вимірювання потужності такого слабого зовнішнього джерела шумових коливань можливе тільки через наявність у складі апаратури РЛС енергетичного приймача з тривалим часом накопичення та відповідного алгоритмічного і програмного забезпечення вимірювань. Реалізація такого приймача тактико-технічним завданням не передбачається.

5. Для точного вимірювання потужності випромінювання зовнішнього джерела потрібна умова стаціонарності фону і власних шумів приймального тракту. Але наявність на території України розгалужених телевізійних та зв'язкових мереж, які працюють в частотному діапазоні роботи РЛС, робить такі вимірювання практично неможливими.

6. На процес вимірювання ДНА "по Сонцю" в РЛС метрового діапазону сильно впливає характер місцевості в районі позиції. В умовах середньопересіченої місцевості результати вимірювань можна вважати дійсними тільки в тих секторах, в яких вони отримані.

7. В цілому, з урахуванням реальних умов зовнішнього середовища в межах України і особливостей побудови сучасних і перспективних РЛС, слід вважати недоцільним використання метода вимірювання ДНА "по Сонцю" для трикоординатних РЛС сантиметрового та дециметрового діапазону через великі кутові розміри Сонця, а для РЛС метрового діапазону – через наявність потужного і нестационарного фонового випромінювання та складність рельєфу.

Список літератури

1. Драбкин А.Л. Антенны / А.Л. Драбкин, Е.Б. Коренберг. – М.: Радио и связь, 1992 – 144 с.
2. Радиоизлучение Солнца, Том 2. Изд-во Ленинградского университета, 1973. – 752 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. В 4 томах. Т. 1. Основы радиолокации / пер. с англ.; под ред. Я.С. Иццоки. – М.: Соврадио, 1976. – 486 с.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. вторая / Б.Р. Левин. – М.: Соврадио, 1968. – 504 с.
5. Абезгауз Г.Г. Справочник по вероятностным расчетам / Г.Г. Абезгауз, А.П. Тронь, Ю.Н. Копенкин, И.А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.
6. Протоколи випробувань РЛС 5Н84АМА. – К.: МО України, 2011.

Надійшла до редколегії 17.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ДЛЯ СНЯТИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН СОВРЕМЕННЫХ РЛС РАЗВЕДКИ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

В.И. Климченко, Г.Г. Камалтинов, О.В. Белавин

Рассматриваются возможности использования в процессе полигонных испытаний современных РЛС РТВ известного метода измерения диаграмм направленности антенн с использованием радиочастотного излучения Солнца.

Анализируются теоретические возможности метода и условия, при которых его применение является приемлемым. Очерчивается круг практических ограничений относительно целесообразности использования отмеченного метода. Рассматривается влияние рельефа и электромагнитной обстановки в пределах Украины на практическое использование метода измерения диаграмм направленности антенн с использованием радиочастотного излучения Солнца.

Ключевые слова: диаграмма направленности антенны, измерения, радиочастотное излучение Солнца.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF THE USE OF RADIO RADIATION OF A SUN FOR THE REMOVAL OF DIAGRAMS OF ORIENTATION OF AERIALS MODERN RADARS SECRET SERVICES OF AIR AIMS

V.I. Klimchenko, G.G. Kamaltnynov, O.V. Belavin

Possibilities of the use are examined in the process of ground tests modern RLS RTV known of method of measuring of diagrams of orientation of aerials with the use of r.f. of a Sun.

Theoretical possibilities of method and condition, at which his application is acceptable, are analysed. The circle of practical limitations is outlined in relation to expedience of the use of the noted method. Influence of relief and electromagnetic situation is examined within the limits of Ukraine on the practical use of method of measuring of diagrams of orientation of aerials with the use of r.f. of a Sun.

Keywords: diagram of orientation of aerial, measuring, r.f. of a Sun.