

О.М. Кубрак, к.т.н., доц.

Т.Й. Атаманчук, ст. інж.

П.С. Борисов, ад'юнкт

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

Національного авіаційного університету

МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ОБСТАНОВКИ В ЗОНІ ДІЇ РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

Запропоновано методику моделювання радіоелектронної обстановки (РЕО) в зоні дії радіотехнічного засобу (РТЗ), за допомогою якої можна здійснити моделювання адитивної суміші радіосигналів з різними просторово-частотними та енергетичними характеристиками, які присутні на вході його приймального пристрою. Наведено приклад застосування методики та оцінено якість формування РЕО в зоні дії РТЗ.

Вступ. При визначенні та забезпеченні електромагнітної сумісності (ЕМС) радіотехнічних засобів (РТЗ) системою радіоконтролю (СРК) вирішується ряд завдань, основним з яких є контроль радіоелектронної обстановки (РЕО). За результатами контролю РЕО визначаються: ступінь завантаженості радіочастотного спектра (РЧС); ступінь ЕМС РТЗ, особливо при введенні їх в експлуатацію; відповідність дозволених до експлуатації РТЗ. Основна інформація, на основі якої формується РЕО – це енергетичні, частотні, часові та просторові параметри радіосигналів джерел радіовипромінювання (ДРВ). Як основні ДРВ для СРК є РТЗ систем управління, добування, руйнування та передачі даних. Безпосереднім джерелом інформації для оцінки РЕО є радіосигнали, структура та параметри яких дозволяють визначити місцеположення та тип ДРВ, а також можливі варіанти впливу на інші РТЗ (тобто визначити ступінь ЕМС методом парної або групової оцінки) [5, 7].

До складу типової схеми РТЗ призначеного для передачі даних між абонентами (А1, А2) на базі сучасних технологій (рис. 1), як правило належить передавальна (ПерА) та приймальна (ПрА) антени, радіоприймальний (РПрП) та радіопередавальний (РПП) пристрої і спеціальний обчислювальний пристрій (СОП). СОП, як правило, містить аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) та цифрові сигнальні процесори (ЦСП).

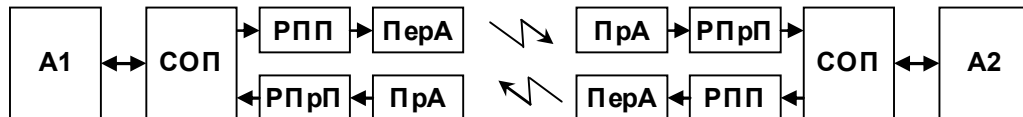


Рис. 1. Типова схема РТЗ на базі сучасних технологій

Таким чином, важливим залишається питання вивчення та дослідження радіосигналів з різними, особливо складними, видами модуляції, визначення їх параметрів для оцінки ступеня ЕМС РТЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останній час суттєво збільшилась кількість РТЗ, що призвело до значного завантаження РЧС і ускладнення оцінювання їх ЕМС. Сучасні РТЗ, розроблені на базі новітніх технологій, забезпечують підвищення швидкодії як функціональних вузлів, так і РТЗ в цілому. Вдосконалюються та стають складнішими закони модуляції радіосигналів, підвищується їх перешкодозахищеність, опановуються нові частотні діапазони (на сьогоднішній день від 3 до 50 ГГц). Широко використовуються радіосигнали з великою базою, інтерес до яких постійно зростає завдяки великій кількості переваг: висока схованість, перешкодостійкість та перешкодозахищеність, висока точність синхронізації та вимірювання затримки сигналу, здатність до кодового розрізнення і ущільнення сигналів та багато інших. Першочергове місце стали займати цифрові технології обробки радіосигналів ДРВ [3, 7, 8, 10]. Широко використовуються цифрові елементи (АЦП, ЦАП, мікроконтролери, програмовані логічні інтегральні схеми, ЦСП тощо), що значно підвищують швидкодію, надійність, точність та відповідність вимогам мінімізації енергетичних затрат та розмірів РТЗ. В джерелі [5] розглядається процес формування РЕО як окремих радіосигналів без врахування ширини смуги пропускання засобу радіоспостереження. В [2, 7] при формуванні моделі РЕО в зоні дії РТЗ не враховується просторовий розподіл ДРВ.

Актуальність та постановка завдання. Постає актуальним питання створення моделей РЕО для детального вивчення як окремих радіосигналів, так і їх адитивної суміші на базі ПЕОМ з метою оцінки ЕМС РЕЗ шляхом використання сучасних алгоритмів оцінювання параметрів радіосигналів. Основна складність полягає в тому, що для роботи з сигналами в реальних умовах важко створити «полігон», де

було б можливо відпрацьовувати РЕО за різних умов (кількість сигналів ДРВ, види їх модуляції, часові, просторові та спектральні характеристики).

Для проведення наукових досліджень, пов'язаних з удосконаленням та розробкою нових алгоритмів оцінювання параметрів радіосигналів, виникає задача моделювання як еталонних сигналів, так і більш адекватної до дійсності адитивної суміші таких сигналів. При цьому необхідно враховувати параметри радіопередавача (джерела шуму), положення його в просторі (на місцевості), існування сигналу в часі та частотному діапазоні, а також особливості радіоприймача РТЗ. Структурна схема сучасного РТЗ, який містить N приймальних каналів (ПК) на базі лінійної еквідистантної антенної решітки (ЛЕАР), призначеного для контролю РЕО та визначення ЕМС, наведена на рисунку 2 [2, 6, 9, 11].

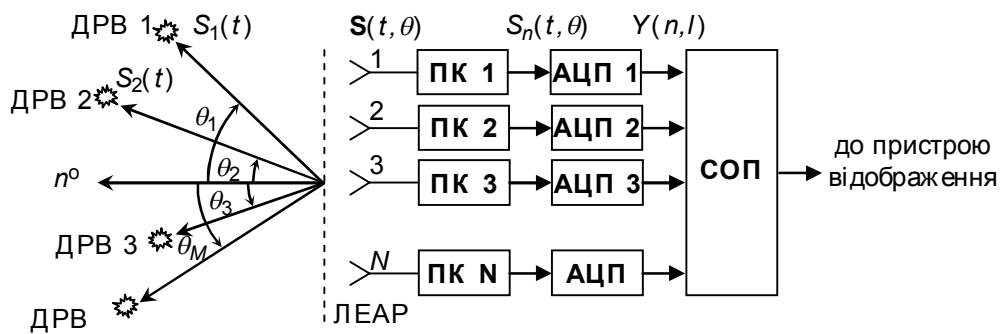


Рис. 2. Структурна схема сучасного N -канального РТЗ, призначеного для контролю РЕО та визначення ЕМС

Як один з варіантів вирішення поставленого завдання, пропонується методика, яка забезпечить відтворення заданого варіанта РЕО в зоні дії РТЗ. Результати формування РЕО можуть бути використані для подальшої їх обробки, тобто оцінки енергетичних, просторово-часових та частотних характеристик з метою тестування алгоритмів аналізу та визначення ЕМС РЕЗ.

Викладення основного матеріалу. Методика формування РЕО в зоні дії РТЗ полягає в наступному:

1. Загальна формула для представлення адитивної суміші радіосигналів від M ДРВ на вході ЛЕАР має вигляд [1, 2, 6]:

$$S(t) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M s_m(t) + \xi(t) & t_k \geq t \geq t_n; \\ \xi(t) & t_k < t < t_n, \end{cases} \quad (1)$$

де $s_m(t)$ – сигнал від m -го джерела радіовипромінювання (ДРВ); $\xi(t)$ – функція, яка характеризує рівень зовнішнього шуму і є стаціонарний гаусівський (нормальний) процес; M – кількість сигналів ДРВ; t_n – час початку сигналу; t_k – час кінця сигналу; $T_c = t_k - t_n$ – тривалість сигналу (часовий строб спостереження); t – поточний час.

$$s_m(t) = U_m(t) \cdot \cos(2\pi f_m(t) + \varphi_m(t) + \varphi_m), \quad (2)$$

де $U_m(t)$ – закон зміни амплітуди m -го сигналу; $f_m(t)$ – закон зміни його частоти; $\varphi_m(t)$ – закон зміни фази; φ_m – початкова фаза m -го сигналу.

Змінюючи в m -му гармонічному коливанні (2) амплітуду або повну фазу за певним законом, в тому числі і випадковим, можна сформувати адитивну сумішу сигналів з різними видами модуляції. На антенний пристрій також значно впливає зовнішній шум, який є гаусівським випадковим процесом і його статистичні характеристики повільно змінюються в часі [1, 11].

2. При прийомі сигналів на фоні шуму як модель розглядається N -елементна ЛЕАР. Припускаючи, що амплітудний розподіл на розкритті АР рівномірний, то множник такої системи для m -го сигналу ДРВ $\mathbf{H}(\theta_m)$ буде мати векторний вигляд [4, 9]:

$$\mathbf{H}^T(\theta_m) = \left[1, e^{j\Delta\varphi_m}, e^{j2\Delta\varphi_m}, \dots, e^{j(N-1)\Delta\varphi_m} \right], \quad (3)$$

де $\Delta\varphi_m = \frac{2\pi d}{\lambda_m} \sin \theta_m$ – зміна фази (фазовий набіг) m -го сигналу від елемента до елемента ЛЕАР; d –

відстань між сусідніми елементами ЛЕАР; λ_m – довжина хвилі m -го сигналу ДРВ; θ_m – напрямок (пеленг) на m -те ДРВ; N – кількість елементів ЛЕАР; T – знак транспонування матриці.

3. Адитивну сумішу M сигналів ДРВ (1) на виході ЛЕАР можна представити відповідно з (3) у вигляді:

$$\mathbf{s}(t, \theta) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M S_m(t) \mathbf{H}(\theta_m) + \xi(t) & t_k \geq t \geq t_n; \\ \xi(t) & t_k < t < t_n, \end{cases} \quad (4)$$

де $\xi^T(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_N(t)]$ – вектор-стовпець розмірністю $N \times 1$, який характеризує рівень зовнішнього шуму на кожному вході ЛЕАР.

4. На виході N приймальних каналів, які мають задані коефіцієнти підсилення, коефіцієнти шуму, смуги пропускання за частотою, запишемо сигнал у вигляді вектора [4, 9]:

$$\mathbf{Y}(t, \theta) = \mathbf{K}\mathbf{S}(t, \theta) + \mathbf{N}_0, \quad (5)$$

де \mathbf{K} – діагональна матриця розмірності $N \times N$, діагональні елементи якої характеризують коефіцієнти підсилення каналів прийому в заданій смузі частот $K_m(f)$; \mathbf{N}_0 – вектор-стовпець розмірністю $N \times 1$, який характеризує рівень внутрішнього шуму N каналів прийому.

5. З виходів ПК сигнали надходять до входів АЦП, де вони перетворюються в цифрову форму і представляються у вигляді двовимірного масиву даних [3, 4, 8, 9, 11]:

$$Y[n, l] = Y_n(l) = \text{digit}(Y_n(t, \theta)), \quad (6)$$

де $Y_n(t, \theta)$ – n -ий елемент вектора (5); n – номер каналу прийому (номер АЦП), $n = 1..N$; l – кількість відліків сигналу, $l = 1..L$.

Розрахунок поточного часу за номером l відліку сигналу представимо як:

$$t = (l - 1)T_d, \quad (7)$$

де T_d – період дискретизації відліків сигналу.

Цифровий код кожного n -го приймального каналу надходить до входів спеціального обчислювального пристрою, де відбуваються його обробка та аналіз.

Перевірка якості формування РЕО в зоні дії РТЗ. Для оцінки спектра аналізованого сигналу застосовується алгоритм перетворення Фур'є [3, 4, 8]:

$$Y(f) = \frac{1}{LT_d} \sum_{l=1}^L Y_1(l) e^{-j2\pi f T_d l}, \quad f = 0 \dots F_d/2, \quad \text{з кроком } \Delta f \leq \frac{1}{LT_d}, \quad (8)$$

де f – частота, на якій здійснюється оцінка амплітуди спектральних складових сигналу на виході першого ПК $Y_1(l)$, $F_d = 1/T_d$ – частота дискретизації; Δf – крок аналізу спектра сигналу.

За результатами оцінки спектра визначаються амплітуди \hat{U}_m та частоти \hat{f}_m спектральних складових радіосигналів.

Для визначення пеленга на ДРВ, застосовано алгоритм Кейпона (максимуму правдоподібності) [4]:

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{X}^{*T}(\theta) \cdot \hat{\Phi}^{-1} \cdot \mathbf{X}(\theta)}, \quad (9)$$

де $P(\theta)$ – функція, яка характеризує розподіл потужності за кутовою координатою θ ; $\mathbf{X}(\theta)$ – вектор аналізу простору виду [4, 8]; $\mathbf{X}^T(\theta) = [1, e^{j\Delta\varphi}, e^{j2\Delta\varphi}, \dots, e^{j(N-1)\Delta\varphi}]$; $\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$;

θ – поточний кут аналізу; λ – середня частота прийому; * – знак комплексного спряження матриці; $\hat{\Phi}$ – оцінка кореляційної матриці сигналів, розмірністю $N \times N$ [4, 8, 9, 11].

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{\Phi}_l = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}(l) \mathbf{Y}^{*T}(l), \quad (10)$$

де $\mathbf{Y}^T(l) = [Y_1(l), Y_2(l), \dots, Y_N(l)]$ – вектор-стовпець розмірності $N \times 1$, елементами якого є l відліків сигналів на N виходах АЦП.

За екстремумами функції $P(\theta)$ визначаються пеленги на ДРВ. Безпосередньо оцінка якості формування РЕО в зоні дії РТЗ здійснюється шляхом порівняння заданих параметрів сигналів ДРВ (U_m, f_m, θ_m) з визначеними, зокрема це амплітуда \hat{U}_m , частота \hat{f}_m та кутова координата $\hat{\theta}_m$.

Опорна схема алгоритму та її опис. На рисунку 3 наведено опорну схему алгоритму моделювання РЕО в зоні дії РТЗ.

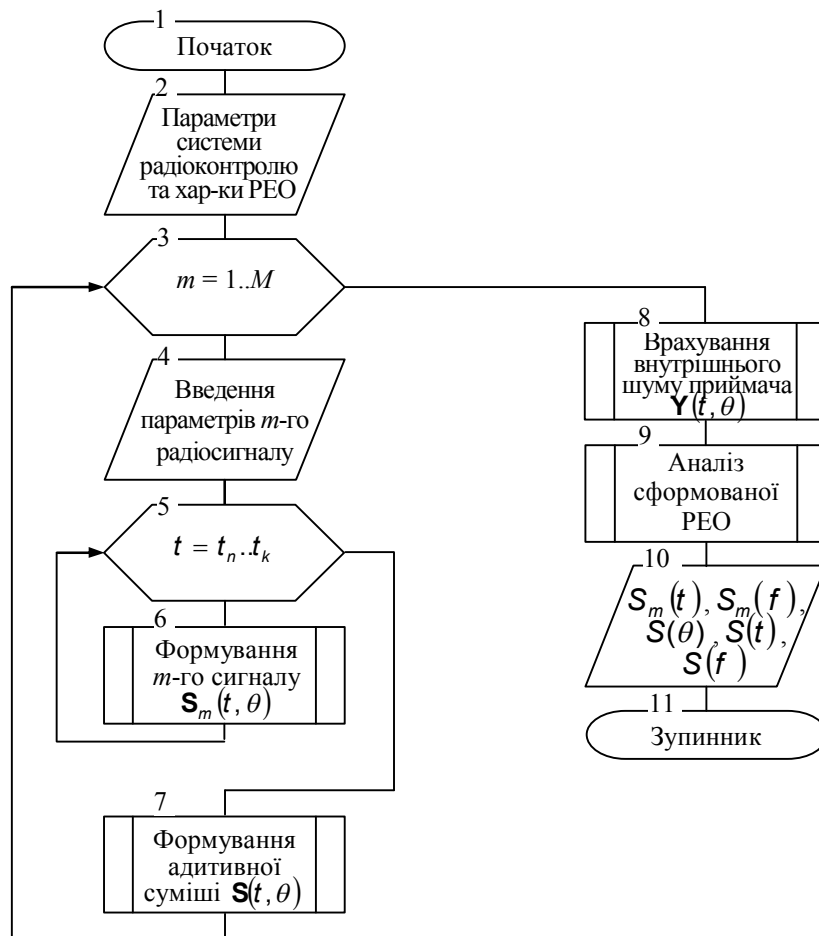


Рис. 3. Опорна схема алгоритму моделювання РЕО в зоні дії РТЗ

Тут у блоці 2 відбувається ввід M – кількості сигналів, що будуть входити у адитивну суміш. У блоці 3 організується цикл за кількістю сигналів. Далі вводяться параметри m -го радіосигналу – t_n , t_k , $U_m(t)$, $f_m(t)$, $\varphi_m(t)$, φ_m – блок 4. Блок 5 – організація циклу за змінною t та блок 6 – процедура формування m -го радіосигналу $S_m(t, \theta)$ згідно з (1)–(3). Після завершення цього циклу в блоці 7 формується адитивна суміш створених радіосигналів $S(t, \theta)$ згідно з (4). Коли цикл за кількістю сигналів M буде завершено, процес виконання алгоритму переходить до блока 8, де проводиться врахування внутрішнього шуму приймача в адитивну суміш $Y(t, \theta)$ (5). У блоці 9 проводиться аналіз сформованої РЕО згідно з виразами (8)–(10). Блок 10 – вивід результатів моделювання у вигляді епюр напруг, частотних та просторових спектрів, сформованих радіосигналів та їх адитивної суміші.

Приклад застосування методики. Програма моделювання РЕО в зоні дії РТЗ розроблена та реалізована в середовищі програмування Delphi 7.0. Використовуючи розроблену програму, сформовано декілька сигналів із різними видами модуляції, що надходять із заданих напрямків, існують у різний час і перетинаються в часі.

Параметри сигналів ДРВ (табл. 1) вводяться у робоче вікно програми «Початкові умови для формування моделі РЕО», яке зображено на рисунку 3, де представлено процес вводу параметрів третього сигналу – фазоманіпульованого (ФМ).

Після вводу параметрів необхідно натиснути функціональну клавішу «Графічне представлення результатів моделювання». На екрані з'явиться вікно програми «Результати моделювання РЕО в зоні дії РТЗ СРК», в якому наведено часове представлення, частотний та просторовий розподіл сигналів ДРВ, при цьому передбачена можливість спостереження як кожного сигналу окремо, так і їх адитивної суміші, а також внутрішнього шуму. На рисунку 4 представлено приклад такого вікна, де показано епюра та оцінка спектра другого сигналу (табл. 1 – амплітудно-модульований (АМ)), епюра та оцінка спектра адитивної суміші сигналів і оцінка їх просторового розподілу (оцінка пеленгів).

Таблиця 1

Початкові умови формування РЕО (параметри сигналів)

№ з/п	Вид сигналу	Пеленг, град.	Номер першого відліку	Номер останнього відліку	Потужність сигналу, мкВт	Центральна частота, МГц	Ширина спектра сигналу, МГц	Початкова фаза сигналу, град.	Маніпуляція фази, град.	Тривалість дискети, мкс	Частота АМ, МГц	Індекс АМ
1	ПРІ	-30	120	230	50	235	$1/\tau_c$	37	0	-	0	0
2	АМ	-5	1	120	40	420	$1/\tau_c + 2F_{AM}$	105	0	-	20	1
3	ФМ	20	60	210	50	310	$1/\tau_d$	0	180	0,03	0	0
4	ЧМ	25	10	270	110	100	90	71	0	-	0	0
5	АМ	38	180	295	50	520	$1/\tau_c + 2F_{AM}$	153	0	-	15	1

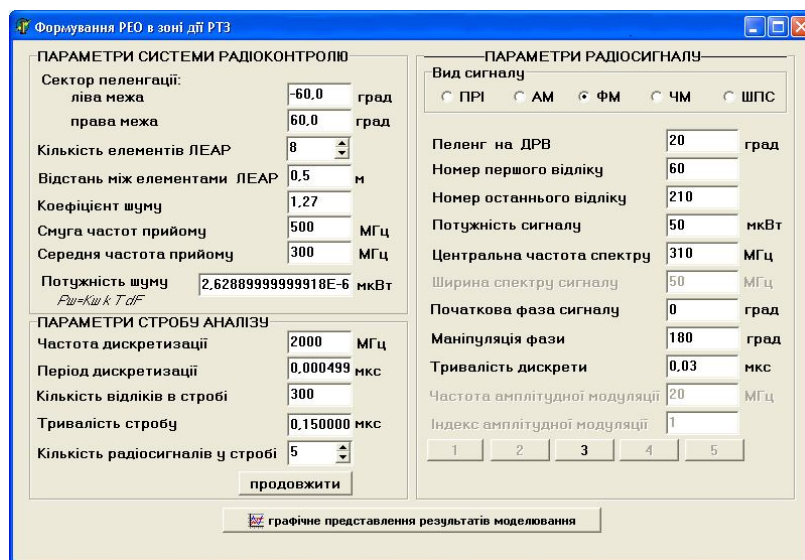


Рис. 4. Вікно програми «Початкові умови для формування моделі РЕО»

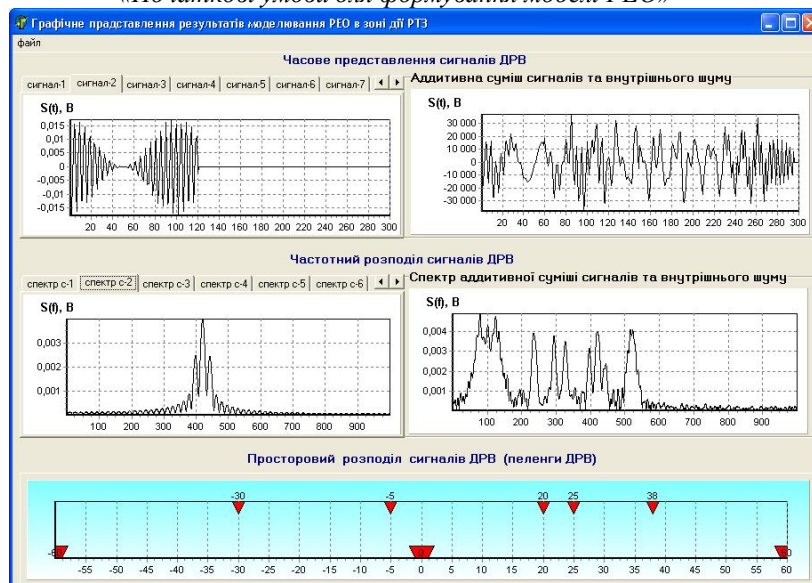


Рис. 5. Вікно програми «Результати моделювання РЕО в зоні дії РТЗ СРК»

Результати аналізу якості формування та оцінювання РЕО

№ з/п	Вид сигналу	U , мВ	\hat{U} , мВ	ΔU , мВ	δU	f , МГц	\hat{f} , МГц	Δf , МГц	δf	θ , град.	$\hat{\theta}$, град.	$\Delta\theta$, град.	$\delta\theta$
1	ПРІ	10,0	4,0	6,0	0,60	235,0	235,3	0,3	0,001	-30,0	-30,4	0,4	0,01
2	АМ	8,9	4,0	4,9	0,55	420,0	420,5	0,5	0,001	-5,0	-5,1	0,1	0,02
3	ФМ	10,0	3,6	6,4	0,64	310,0	310,4	0,4	0,001	20,0	20,3	0,3	0,01
4	ЧМ	14,8	3,7	11,1	0,75	100,0	100,1	0,1	0,001	25,0	25,3	0,3	0,01
5	АМ	10,0	4,1	5,9	0,59	520,0	520,5	0,5	0,001	38,0	38,5	0,5	0,01

Проводячи аналіз результатів досліджень шляхом порівняння початкових даних, можна робити висновок про правильність формування РЕО за значеннями абсолютних та відносних помилок, розрахованих за формулами [1, 3, 11] відповідно $\Delta z = |z - \hat{z}|$, $\delta z = \frac{\Delta z}{|z|}$, де z – аналізований параметр,

а саме це такі як, амплітуда сигналу $U = \sqrt{2P}$, центральна частота спектра сигналу f та пеленг θ . Великі помилки в оцінці амплітуди сигналів пов'язані з їх імпульсною структурою та методом отримання спектра (8) шляхом усереднення по всьому інтервалу аналізу, тобто і там, де сигнал не існує у часі, а також не враховується розподіл потужності в спектрі для складних сигналів.

Висновки. В статті представлено варіант структурної схеми сучасного РТЗ призначеного для оцінки РЕО та визначення ЕМС РТЗ (рис. 2).

Запропоновано методику моделювання РЕО в зоні дії РТЗ для подальшої обробки та визначення ЕМС.

Розроблено схему алгоритму моделювання РЕО в зоні дії РТЗ.

Розроблена методика дозволить формувати еталонні моделі РЕО шляхом використання банку сигналів з заданими видами модуляції та параметрами.

Розроблене програмне забезпечення підвищить наочність при проведенні наукових досліджень щодо оцінки параметрів сигналів та РЕО в цілому.

Результати імітаційного моделювання показують придатність методики щодо оцінки РЕО. Це дає змогу підвищити якість вивчення та врахування особливостей РЕО при оцінці електромагнітної сумісності своїх РЕЗ перед визначенням їх місця розташування при веденні воєнних операцій.

Список використаної літератури:

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник / С.И. Баскаков. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1988. – 488 с.
2. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы : учебник / А.С. Винницкий. – М. : Радио и связь, 1986.
3. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие. В 2 ч. / А.С. Глинченко. – Ч. 1. – Красноярск : Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с. – Ч. 2. – Красноярск : Изд-во ИПЦ КГТУ, 2001. – 184 с.
4. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. / С.Л. Марпл.-мл. – М. : Мир, 1990. – 384 с.
5. Петровский В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие / В.И. Петровский, Ю.Е. Седельников. – М. : Радио и связь, 1986. – 216 с.
6. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы : учебник / Ю.М. Казаринов. – М. : Высшая школа, 1990. – 274 с.
7. Куприянов А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М. : Вузовская книга, 2003. – 528 с.
8. Степанов А.В. Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи / А.В. Степанов, С.А. Матвеев. – М. : Москва Солон-Пресс, 2003. – 145 с.
9. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
10. Скляр Б. Цифровая радиосвязь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. / Б.Скляр. – 2-ое изд., испр. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
11. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория : справочник / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др. ; под ред. Я.Д. Ширмана. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.

КУБРАК Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, начальник факультету радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка та формування радіосигналів;
- моделювання радіотехнічних засобів.

АТАМАНЧУК Тетяна Йосипівна – старший інженер кафедри Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- алгоритми формування радіосигналів.

БОРИСОВ Петро Спиридонович – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка радіосигналів;
- моделювання радіотехнічних засобів.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2012

Кубрак О.М., Атаманчук Т.Й., Борисов П.С. Методика моделювання радіоелектронної обстановки в зоні дії радіотехнічного засобу

Кубрак А.М., Атаманчук Т.И., Борисов П.С. Методика моделирования радиоэлектронной обстановки в зоне действия радиотехнического средства.

Kubrak O.M., Atamanchuk T.I., Borysov P.S. Methods of design of the radio electronic stopping are at the area of action of radio engineering mean.

УДК 621.396.96:519.852.6

Методика моделирования радиоэлектронной обстановки в зоне действия радиотехнического средства / А.М. Кубрак, Т.И. Атаманчук, П.С. Борисов

Предлагается методика моделирования радиоэлектронной обстановки (РЭО) в зоне действия радиотехнического средства (РТС), с помощью которой можно осуществить моделирование аддитивной смеси радиосигналов с различными пространственно – частотными и энергетическими характеристиками, присутствующими на входе его приёмного устройства. Приводится пример применения методики и оценивается качество формирования РЭО в зоне действия РТС.

УДК 621.396.96:519.852.6

Methods of design of the radio electronic stopping are at the area of action of radio engineering mean / O.M. Kubrak, T.I. Atamanchuk, P.S. Borysov

The methods of design of the radio electronic stopping (RES) are offered at the area of action of radio engineering mean (REM), by means of which it is possible to carry out the design of additive mixture of radio signals with different spatially - by frequency and power descriptions, present on the entrance of his takers-off. An example of application of methods is made and quality of forming of RES is estimated in the area of action REM.