

УДК 621.396.12

Л.В. КАРПОВА, В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Н.М. САМАРУК
Хмельницький національний університет**МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЦІЛІ ПО ФУР'Є-ОБРАЗУ ВІДБИТОГО СИГНАЛУ**

В статті представлено теоретичний аналіз і числове моделювання деяких можливих алгоритмів вимірювання спектральних характеристик відбитого сигналу і оцінки помилок таких вимірів, а також визначення порогового відношення сигнал/шум, що дозволяє застосувати адаптивну процедуру моноімпульсної радіолокації. Проаналізовано можливості розрахункового методу визначення спектра, визначення максимумів спектральної щільності по наближенню сигналу кінцевим рядом. Викладено принцип адаптації спектру виявленого сигналу і оцінено збільшення точності оцінки параметрів цілей при використанні адаптивної процедури моноімпульсної радіолокації. Досліджено чисельні алгоритми, що реалізують відповідні вимірювання, а також апаратні схеми, що суттєво спрощують практичну реалізацію вимірювальних установок.

Ключові слова: спектр, сигнал, співвідношення сигнал/шум, спектральна щільність, моноімпульсна радіолокація.

L.V. KARPOVA, V.I. LUZHANSKIY, N.M. SAMARUK
Khmelnitsky National University**MATHEMATICAL METHOD OF DETERMINATION OF TARGET SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE
FOURIER-IMAGE OF REFLECTED SIGNAL**

The article presents a theoretical analysis and numerical modelling of some possible algorithms for measuring the spectral characteristics of the reflected signal and estimating the errors of such measurements, as well as determining the threshold signal-to-noise ratio, which allows to apply the adaptive procedure of monopulse radar. The possibilities of the calculated method for determining the spectrum and the determination of the spectral density maxima for the signal approximation by the finite series are analyzed. The principle of adaptation of the spectrum of the detected signal is presented and the increase in the accuracy of the estimation of target parameters using an adaptive procedure of monopulse radar is estimated. The article investigates the numerical algorithms, which implement the corresponding measurements, as well as the hardware schemes, and considerably simplify the practical realization of the measuring installations.

Key words: spectrum, signal, signal / noise ratio, spectral density, monopulse radar.

Вступ. Експериментальна реалізація надширококутових електромагнітних імпульсів відкриває нові можливості для підвищення точності визначення параметрів цілі і покращення її характеристик супроводу при моноімпульсній радіолокації об'єктів. Ширина спектра виявленого імпульсу в даному випадку настільки велика [1–3], що для різних частот падаючого випромінювання коефіцієнт відбитої цілі (величина ефективно відбиваючої поверхні) може мати відчутні відмінності. В цьому випадку приведення діапазону частот виявленого імпульсу у відповідність з діапазоном максимальних значень ефективно відбиваючої цілі може дати суттєву перевагу в точності оцінки динамічних параметрів виявленого об'єкту.

Методи генерації потужних наносекундних електромагнітних імпульсів допускають оперативну перебудову параметрів випромінюваних сигналів і, зокрема, зміну спектру випромінювання, в тому числі за рахунок використання блочно-модульного способу побудови випромінювальної системи. Процедура адаптації параметрів виявленого імпульсу в даному випадку може бути побудована за наступним принципом.

На першому етапі адаптивної процедури проводиться опромінення простору потужним надширококутовим електромагнітним імпульсом і по відбитому сигналу приймається рішення про виявлення цілі. Одночасно проводиться спектральний аналіз зонduючого імпульсу, і результати $S_0(\omega)$ записуються в блок зберігання інформації. При позитивному рішенні про виявлення проводиться аналіз спектра відбитого сигналу $S(\omega)$. Для знаходження максимуму в спектральній характеристиці відбитої цілі $\sigma(\omega)$ в обчислювальній системі утворюється відношення $\sigma(\omega) = |S(\omega) / S_0(\omega)|$ і проводиться аналіз максимумів цієї величини. Якщо один або кілька максимумів виявляються вищими за середнє значення ефективно відбиваючої поверхні, то проводиться підстроювання спектра випромінюваного імпульсу так, щоб максимальні компоненти спектра виявленого імпульсу припадали на максимальне значення ефективно спектральної відбитої поверхні. При цьому ширина спектра випромінюваного імпульсу також повинна узгоджуватися з залежністю $\sigma(\omega)$, щоб енергія відбитого сигналу приймала максимально можливе значення.

Конкретні закони зміни спектра випромінюваного імпульсу в залежності від вимірювальної величини $\sigma(\omega)$ повинні бути розроблені для конкретних експериментальних параметрів генеруючої системи, зокрема, числа незалежних каналів випромінювання, частотного перекриття діапазону генерації, можливих характеристик передбачуваних цілей, величини можливого звуження спектра імпульсу генерації близько несучої частоти і т.п. Відзначимо, що при наявності помилок визначення спектральних амплітуд ефективно відбиваючої цілі адаптацію слід проводити, коли різниця максимального значення $\sigma(\omega)$ і середнього значення стане більше помилки визначення спектральних компонентів $\sigma(\omega)$.

У процесі супроводу цілі можливі повільні зміни спектральної характеристики ефективної відбиваючої поверхні, викликані, наприклад, поворотом цілі і т.п. В цьому випадку для збереження високої точності визначення динамічних параметрів цілі необхідно періодично проводити корекцію спектра виявленого імпульсу, що буде складатися в повторному вимірюванні спектра відбитого сигналу, у визначенні $\sigma(\omega)$ та зміні відповідно до цієї нової залежності спектральних характеристик випромінювального імпульсу.

Точність визначення параметрів цілі при адаптивній процедурі радіолокації. Оцінимо збільшення точності визначення параметрів цілі при використанні адаптивної процедури радіолокації. Через наявність геометричних неоднорідностей профілю об'єкта і частотної дисперсії в матеріалі покриття ефективна площа розсіювання цілі може відрізнятись на різних частотах в декілька разів. Нехай, наприклад, максимальне значення $\sigma(\omega)$, досягається в районі частоти ω^* і більше середнього по спектру значення ефективної відбитої поверхні цілі σ_{av} і η раз:

$$\sigma(\omega^*) = \eta \sigma_{av}. \quad (1)$$

Нехай весь спектр зондуючого імпульсу знаходиться поблизу частоти ω^* . Тоді виграш в енергії відбитого від цілі сигналу складає η раз. Відношення сигнал/шум μ має вигляд:

$$\mu = \frac{G_t A_t \sigma(\omega) P_t \tau}{(4\pi)^2 R^4 N_0} = \frac{G_t A_t \sigma_{av} P_t \tau}{(4\pi)^2 R^4 N_0} \eta, \quad (2)$$

де R – відстань від радіолокаційної станції до цілі; G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антени; A_t – ефективна площа апертури приймальної антени; P_t – потужність передавача моноімпульсної радіолокаційної станції; τ – тривалість імпульсу передавача; N_0 – спектральна щільність білого шуму приймача.

Тоді виграш у відношенні сигнал/шум складатиме в η раз. Очевидно, що збільшення співвідношення сигнал/шум відповідає ефективному росту потужності передавача також в η раз, що підтверджує важливість використання адаптивної процедури при моноімпульсній радіолокації малопомітних об'єктів.

Дисперсія помилок оцінок параметрів цілі (дальності, кутових координат, швидкості та ін.) обернено пропорційні відношенню сигнал/шум μ для відбитого сигналу. Отже, абсолютні величини помилок зменшуються в $\sqrt{\eta}$ раз при зростанні відношення сигнал/шум в η раз.

Таким чином, застосування адаптивної процедури моноімпульсної радіолокації дозволяє в певних випадках суттєво (в кілька разів) знизити помилки визначення параметрів цілі.

Відзначимо, що для завдання виявлення цілі адаптація параметрів виявленого імпульсу не дає виграшу по чутливості, так як в умовах відсутності інформації про спектральні характеристики цілі (ап'юорної невизначеності) ефективність процедури адаптації виявляється невисокою. У той же час при наявності додаткової ап'юорної інформації про характер цілі можлива часткова адаптація з відповідним зростанням співвідношення сигнал/шум, що призведе не тільки до поліпшення оцінок параметрів цілі, але і до збільшення дальності виявлення.

Для детермінованого фізично реалізованого сигналу $S(t)$ може бути введений пов'язаний з Фур'є сигнал $S(\omega)$, причому обидва ці сигнали пов'язані парою перетворень Фур'є:

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (3)$$

В такому випадку спектр може бути однозначно визначено по тимчасовій залежності сигналу. Однак, в реальних установках завжди присутні власні шуми, крім того, навіть у гіпотетичному випадку відсутності шумів точність вимірювання залежності $S(t)$ на практиці не може бути нескінченною. Зазначені причини зумовлюють необхідність при визначенні спектра сигналу виходити з більш загальної моделі, що враховує як наявність внутрішніх шумів, так і кінцеву інструментальну точність вимірювання сигналу. Таким чином, для аналізу процесу вимірювання спектра необхідно виходити з моделі фільтрації сигналу $S(t)$ в приймальних шумах установки $n(t)$.

Нехай на вході приймального пристрою є реалізація випадкового процесу $x(\omega)$ тривалістю T , що представляє собою суміш сигналу $S(t)$ з невідомими параметрами і стаціонарного гаусівського шуму $n(t)$:

$$x(t) = S(t) + n(t). \quad (4)$$

За конкретної реалізації $x(t)$ потрібно визначити спектральні характеристики квазидетермінованого сигналу $S(t)$.

Нехай для визначеності тривалість τ сигналу $S(t)$ значно менше часу вимірювання T випадкового процесу $x(t)$. В даному випадку для реалізації випадкового процесу справедливо перетворення Фур'є відповідно до виразу (3). Однак в силу випадкового характеру процесу $x(t)$ його Фур'є-образ також буде випадковою величиною:

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{i\omega t} dt + \int_{-\infty}^{\infty} n(t)e^{i\omega t} dt = S(\omega) + n(\omega). \quad (5)$$

Визначимо характеристики вимірювання спектра $S(\omega)$, що отримані при обробці випадкового процесу $x(t)$. Візьмемо в якості оцінки $\bar{S}(\omega)$ спектра $S(t)$ спектр випадкової величини. Очевидно, що оцінка спектра $\bar{S}(\omega)$ також є випадковою величиною. Середнє значення, $\bar{S}(\omega)$, тобто середнє по ансамблю значення спектра $x(\omega)$ випадкового процесу $x(t)$ знайдемо, враховуючи, що середнє значення $n(\omega)$ дорівнює нулю:

$$\bar{S}(\omega) = \langle x(\omega) \rangle = S(\omega). \quad (6)$$

Таким чином, оцінка спектра $\bar{S}(\omega)$ незмішена. Для дисперсії комплексного випадкового процесу $\bar{S}(\omega)$ маємо [4,5]

$$D\{\bar{S}(\omega)\} = \langle |x(\omega) - S(\omega)|^2 \rangle = \langle |n(\omega)|^2 \rangle = G_T(\omega). \quad (7)$$

де $G_T(\omega)$ пропорційна спектральній щільності процесу $n(t)$, розрахована для реалізації довжиною T .

Вираз $G_T(\omega)$ через кореляційну функцію $K(\tau)$ процесу $n(t)$, знайдемо:

$$D\{\bar{S}(\omega)\} = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} \langle n(t_1)n(t_2) \rangle e^{-i\omega(t_1-t_2)} dt_1 dt_2 = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} K(t_1-t_2) e^{-i\omega(t_1-t_2)} dt_1 dt_2. \quad (8)$$

Після заміни змінних і інтегрування отримаємо

$$D\{\bar{S}(\omega)\} = \int_{-T}^T (T-|\tau|) K(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (9)$$

що для випадкового процесу $n(t)$ з білим спектром ($K(\tau) = N_0\delta(\tau)$) дає

$$D\{\bar{S}(\omega)\} = N_0T.$$

Таким чином, дисперсія виявляється тим більша, чим довший інтервал спостереження T . Очевидно, що при усередненні по всій реалізації дисперсія не прямує до нуля, тобто процес $n(\omega)$ не є ергодичним [1].

Вибираючи мінімально можливий інтервал спостереження, рівний тривалості сигналу τ (що можна зробити, якщо приблизно відома відстань до цілі), для дисперсії оцінки спектра знайдемо:

$$D\{\bar{S}(\omega)\} = N_0\tau, \quad (10)$$

Таким чином, помилка вимірювання спектра не залежить від величини спектральної амплітуди, тобто відносна точність буде найбільшою для максимальних значень спектральних амплітуд $S(\omega)$. Для компонент з частотою ω^* близько максимуму спектра $S(\omega)$ отримаємо таке значення відносної точності вимірювань

$$\delta^2(\omega^*) = D\{\bar{S}(\omega)\} / |\bar{S}(\omega)|_{\max}^2 = N_0\tau / |\bar{S}(\omega)|_{\max}^2. \quad (11)$$

Припускаючи, що спектр сигналу $S(\omega)$ не має вузьких і високих піків, відношення сигнал/шум можна приблизно записати в наступному вигляді

$$\mu \approx |\bar{S}(\omega)|_{\max} \Delta\omega / (2\pi N_0) = |\bar{S}(\omega)|_{\max} / (N_0\tau), \quad (12)$$

де враховано, що в силу широкосмуговості виконується співвідношення $\Delta\omega\tau \approx 2\pi$ між ефективною шириною спектра і тривалістю імпульсу. З виразів (11) і (12) остаточно для відносної помилки визначення спектральних амплітуд маємо:

$$\delta(\omega^*) \geq \frac{1}{\mu^{1/2}}. \quad (13)$$

Така ж відносна помилка буде і для $\sigma(\omega)$, так як спектр зондуючого сигналу $S_0(\omega)$ в силу великого відношення сигнал/шум для нього може бути вимірний з точністю, що істотно перевищує (13).

Таким чином, вимір спектральних компонентів ефективною відбиваючої цілі може бути реалізовано по вимірюванню спектра відбитого імпульсу, причому відносна помилка виміру виявляється тим менше, чим більше відношення сигнал/шум.

Практична реалізація. В якості моделі відеоімпульсу було використано синусоїдальне коливання (рис. 1), що складається з одного періоду, причому довжина періоду була прийнята за одиницю (все відлічувалося в частках періоду вихідного відеоімпульсу). Загальна довжина відрізка моделювання в цьому випадку вибиралася рівною 10 періодам. Радіоімпульс (рис. 2) містив 10 періодів синусоїдальних коливань, а загальна довжина відрізка моделювання дорівнювала 50 періодам.

На рис. 1 і рис. 2 представлені також спектри вихідного відеоімпульсу і радіоімпульсу. Величина спектра нормована для наочності на максимальне значення, а частота нормована на середню частоту сигналу. Така нормування дозволяє єдиним чином описувати імпульси з різною середньою частотою, роблячи результати моделювання реалізованими для різних практичних ситуацій.

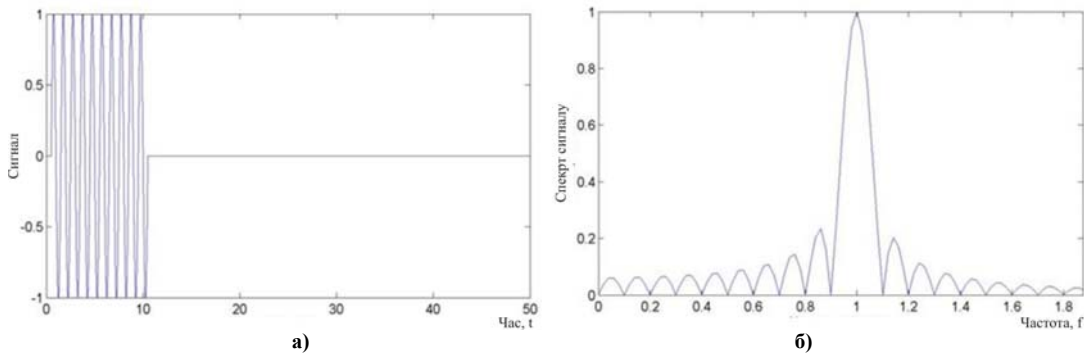


Рис. 1. Відеоімпульс (а) і його спектр (б), що використані для чисельного моделювання роботи адаптивної процедури підстроювання спектра. Час унормовано на тривалість одного періоду, частота – на середню частоту спектра сигналу

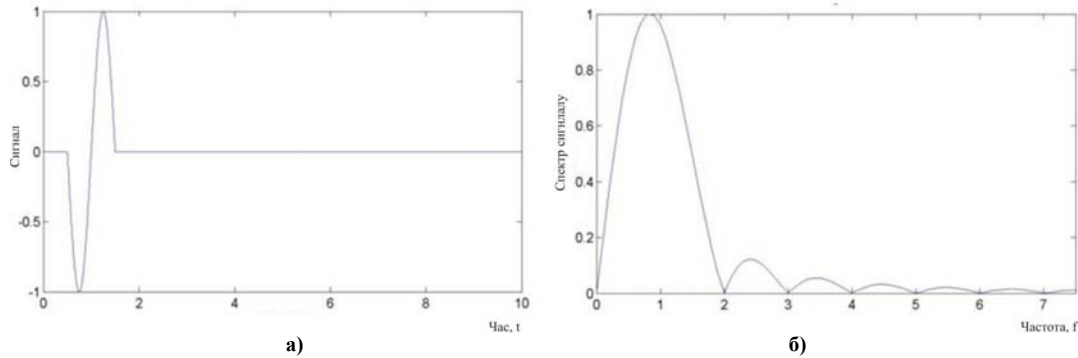


Рис. 2. Радіоімпульс (а) і його спектр (б), використані для чисельного моделювання роботи адаптивної процедури підстроювання спектра. Час унормовано на тривалість одного періоду, частота – на середню частоту спектра сигналу

Для чисельного моделювання адаптивного підстроювального спектра виявленого сигналу була використана форма залежності (рис. 3,а) спектральної ефективної відбиваючої цілі $\sigma(f)$ від частоти. Відповідно до рис. 3,а, відбивання виявленого імпульсу від цілі моделювалось як проходження імпульсу через фізично реалізований лінійний фільтр з постійними параметрами з амплітудно-частотною характеристикою $\sigma(f)$.

$$S_1(f) = \sigma(f)S_0(f), \tag{14}$$

де $S_1(f)$ – спектр відбитого сигналу, $S_0(f)$ – спектр зонду чого сигналу. Крива $\sigma(f)$ мала один максимум, причому величина максимуму буда в одному випадку в 2 рази більшою середнього значення ефективної відбитої поверхні, а в іншому – в 7.5 разів більша середнього значення.

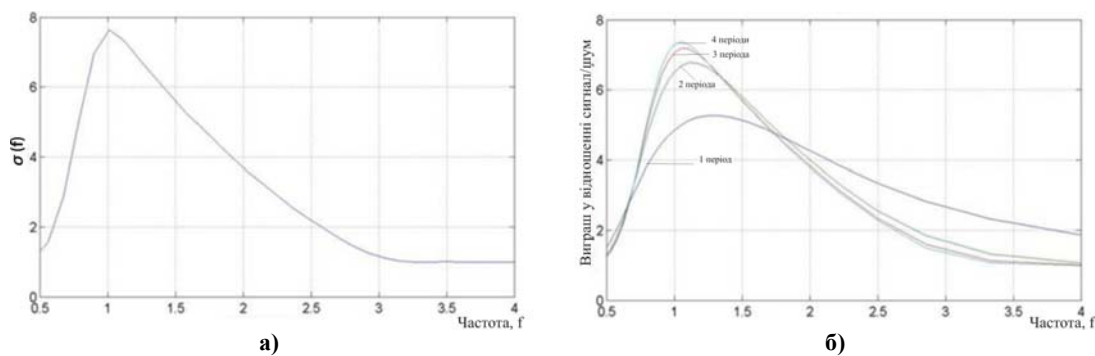


Рис. 3. Залежність спектральної ефективної відбитої поверхні $\sigma(f)$ від частоти (а), б – виграш у відношенні сигнал/шум при адаптивному підстроюванні тривалості виявленого імпульсу і числа періодів (крива n – число періодів) при подальшому збільшенні числа періодів відношення сигнал/шум не росте.

Відносна висота максимуму $\sigma(f)$ дорівнює 7.5

Відеоімпульси, що відбиті від цілі (пройшли через лінійний фільтр (14)), представлені на рис. 4. Відзначимо, що зміна форми імпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ несуттєве, в той час, як для $(\sigma(f))_{\max} = 7,5$ на початку і кінці імпульсу з'являються спадаючі коливання, які означають суттєву зміну спектрального складу імпульсу.

Дійсно, при $(\sigma(f))_{\max} = 2$ відбуваються тільки несиметричні зміни високих бокових пелюсток спектра відносно центральної. Для $(\sigma(f))_{\max} = 7,5$ трансформація спектру відеоімпульсу виявляється більш значною, аж до того, що центральна пелюстка спектра відбитого сигналу стає двогорбною, а перший бічний максимум виростає майже в три рази в порівнянні з вихідним сигналом. Ширина головної пелюстки спектру

сигналу вибрана в порівнянні з шириною максимуму спектральної ефективною відбиваючої цілі, що, очевидно, відповідає можливим характеристикам максимумів $\sigma(f)$ літальних апаратів (середня довжина хвилі відеоімпульсу становить 0.3-1.5 м).

Спектр радіоімпульсу значно вузьчий від спектра відеоімпульсу, тому радіоімпульс практично не змінює форму при проходженні через лінійний фільтр (14), тобто форма спектру змінюється незначно. У разі радіоімпульсу (рис. 5) ширина його спектру виявляється значно меншою від ширини спектра ефективною відбиваючої поверхні цілі $\sigma(f)$ (довжина хвилі радіоімпульсу близько 3 см).

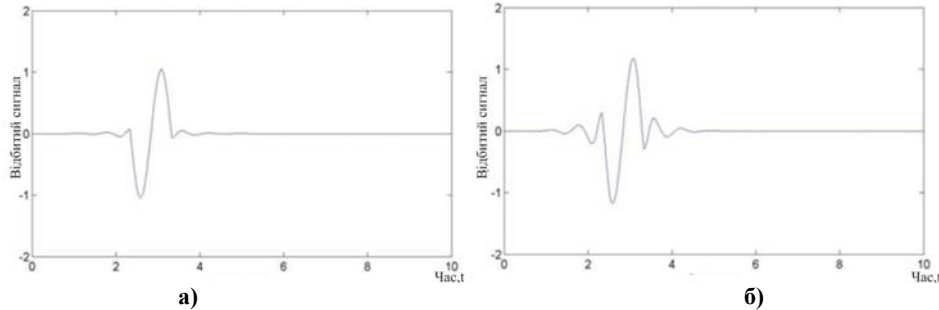


Рис. 4. Вид відбитого від цілі відеоімпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ (а) і $(\sigma(f))_{\max} = 7,5$ (б)

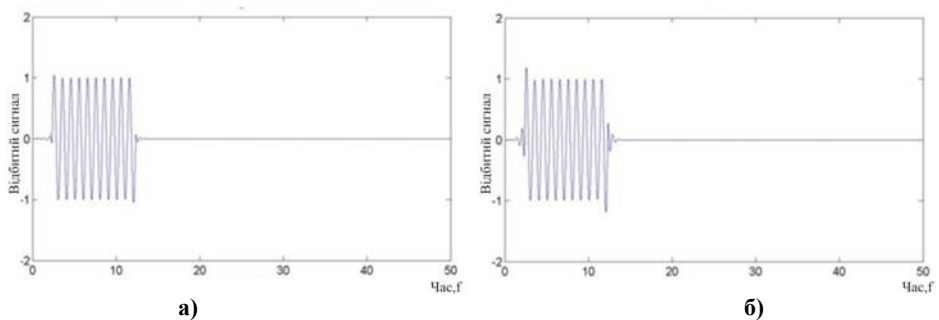


Рис. 5. Вид відбитого від цілі радіоімпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ (а) і $(\sigma(f))_{\max} = 7,5$ (б)

Висновки. Запропоновано адаптивна процедура підстроювання спектра виявленого імпульсу у відповідності з частотними діапазонами максимального значення ефективного відбитого об'єкта. В результаті радіолокації цілі широкосмуговим імпульсом по спектру відбитого сигналу визначаються частоти, на яких ефективна відбиваюча поверхню цілі приймає максимальне значення. Спектр випромінюваного сигналу перебудовується так, щоб його основна енергія, що знаходиться поблизу цих частот. Застосування такої процедури дозволяє поліпшити точність визначення параметрів мети без відповідного збільшення потужності передавача, причому виграш в певних випадках може бути в кілька разів.

Література

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И.Тихонов. – М. : "Радио и Связь", 1982.
2. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации : коллективная монография / А.В. Соколов. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М. : "Советское радио", 1969.
4. Куликов Е.И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М. : "Советское радио", 1978.
5. Богданович В.А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов / В.А. Богданович, А.Г. Вострецов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

References

1. Tihonov V.I. Statisticheskaja radiotekhnika / V.I.Tihonov. – M., "Radio i Svjaz", 1982.
2. Sokolov A.V. Voprosy perspektivnoj radiolokacii. Kollektivnaja monografija / A.V. Sokolov. – M.: Radiotekhnika, 2003. – 512 s.
3. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki / B.R. Levin. – M., "Sovetskoe radio", 1969.
4. Kulikov E.I. Ocenka parametrov signalov na fone pomeh / E.I. Kulikov, A.P. Trifonov. – M., "Sovetskoe radio", 1978.
5. Bogdanovich V.A. Teorija ustojchivogo obnaruzhenija, razlichenija i ocenivanja signalov / V.A. Bogdanovich, A.G. Vostrecov – M.: FIZMATLIT, 2004. – 320 s.

Рецензія/Peer review : 07.06.2017 р.

Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.