

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ КОГЕРЕНТНОСТІ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ІМПУЛЬСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Досліджено потенційні можливості використання імпульсних зондуючих сигналів в когерентних радіолокаційних каналах з узгодженою обробкою сигналів. Отримано ряд аналітичних виразів для функції невизначеності, що дають змогу пов'язати кутову нестабільність і неточність відтворення амплітудної обвідної з потенційним виграшом в роздільній здатності як за просторовими координатами так і за доплерівським зміщенням частоти. В ході аналізу отриманих виразів показано, що існує нелінійна залежність параметрів функції невизначеності і параметрів радіолокаційних сигналів. Виходячи з цього, обґрунтовано необхідність вирішення задачі оптимізації при формуванні алгоритму виявлення та розрізнення в приймачі.

На підставі отриманих результатів показано, що імпульсні радіолокаційні сигнали без внутрішньої модуляції можуть бути основою когерентних систем з високою роздільною здатністю, за умови використання їх внутрішніх кутових і амплітудних нестабільностей в якості модулюючих компонент. Для практичної реалізації ідеї, запропоновано варіант побудови структурної схеми приймача імпульсної радіолокаційної системи, який забезпечує узгоджену обробку радіолокаційних сигналів з випадковою внутрішньою модуляцією. Показано, що наявності нестабільності частоти імпульсних генераторів НВЧ достатньо, щоб розглядати її в якості внутрішньої модуляції сигналу за умови попереднього детектування його форми при формуванні сигналів у кожному періоді зондування.

Аналізуючи функції невизначеності імпульсних радіолокаційних сигналів з типовими формами комплексної обвідної показано, що при наявності одночасно амплітудної і частотної модуляцій існує їх співвідношення, при якому відбувається посилення або втрата ефекту від їх урахування. Виходячи з цього показано, що при проектуванні імпульсних радіолокаційних систем, важливо враховувати внутрішню нестабільність імпульсних радіолокаційних сигналів, щоб запобігти надмірній втраті розрізнення і точності вимірювання координат.

Приведені результати моделювання, які показують, що запропонований алгоритм дає змогу отримати суттєвий виграш в точності вимірювання координат і оцінці доплерівських частот для цього класу радіолокаційних систем. При цьому, алгоритм не передбачає внесення змін в передавач радіолокаційної системи, що важливо при модернізації.

Ключові слова: радіолокація, фільтрація, когерентність, узгоджена обробка, кореляція, функція невизначеності.

Вступ та постановка проблеми. Розвиток активних методів радіолокації, тенденційно можна окреслити двома окремими напрямками – когерентними і некогерентними [1]. Історично, першість була завжди за некогерентними, оскільки для них була напрацьована більш перспективна елементна база і показники їх ефективності задовольняли існуючі потреби. Проте, з часом, першість перейшла до когерентних систем, оскільки значно зросли вимоги до ефективності систем радіомоніторингу, що фізично не могли бути реалізовані на некогерентній основі. На сьогодні, ще існує цілий клас радіолокаційних систем з некогерентною основою – імпульсні радіолокаційні системи, які характеризуються цілою низкою достатньо значимих показників, проте є неконкурентноздатними через обмеженість в значеннях показників роздільної здатності. Основною причиною цих обмежень, є низька частотна (фазова) стабільність імпульсних генераторів НВЧ і наявність значного «згладжуючого» впливу елементів тракту радіочастоти передавача при генеруванні зондуючих сигналів [2]. В сукупності, ці два фактори нівелюють будь-які спроби підвищення ефективності імпульсних радіолокаційних систем, переводячи їх в категорію безперспективних. Проте, як буде показано нижче, імпульсні радіолокаційні системи, при

застосуванні нестандартних підходів внутрішньоперіодної і міжперіодної обробки сигналів можуть забезпечити достатньо високі значення основних показників ефективності, в тому числі і за роздільною здатністю.

Основна частина. При реалізації методів активної радіолокації, основним і єдиним носієм інформації про наявність і параметри цілей в зоні огляду, є зондуючі сигнали, при цьому, саме їх властивості, в першу чергу, визначають основні характеристики радіолокаційних засобів в цілому. З цієї причини, основні зусилля інженерів при розробці

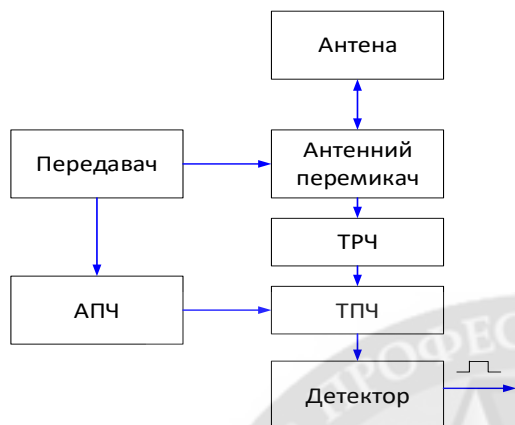


Рис. 1. Типова структура прийомо-передавача імпульсної РЛС

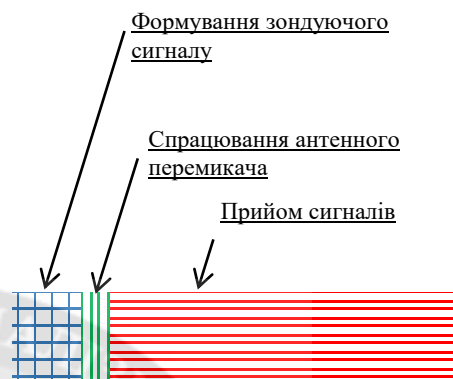


Рис. 2. Алгоритм роботи імпульсної РЛС

радіолокаційних засобів були спрямовані на пошук зондуючих сигналів з оптимальними характеристиками [1, 3, 4] і застосування відповідних їм узгоджених алгоритмів виявлення та розрізнення. В імпульсних РЛС, з розвитком елементної бази засобів цифрової обробки сигналів, намагались навпаки мінімізувати вплив будь-яких модулюючих чинників при формуванні сигналів, що з огляду на особливості реалізації активних методів радіолокації достатньо легко реалізувати колами АПЧ і амплітудної корекції. Типова структурна схема

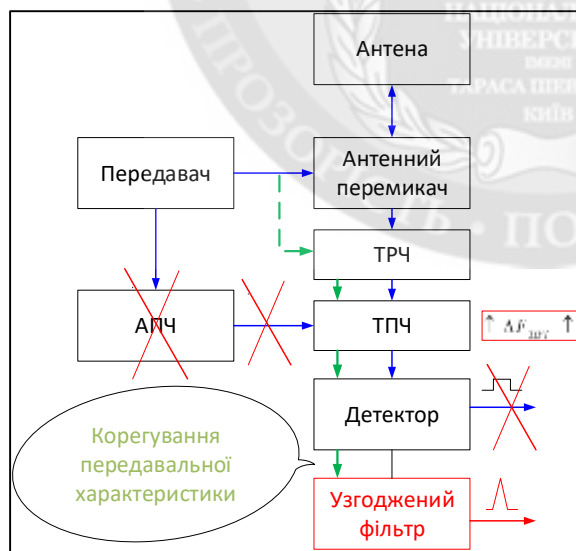


Рис. 3. Удосконалена структура імпульсної РЛС

прийомо-передавача імпульсної радіолокаційної системи [2] приведена на рис. 1

На рис. 2 приведено алгоритм роботи імпульсної радіолокаційної системи, що містить три режими: формування, очікування, прийом. Аналізуючи приведені рисунки (рис. 1, рис. 2) можна помітити цілком очевидну, потенційну можливість підвищення ефективності таких радіолокаційних засобів, суть якої полягає у кардинальній зміні відношення до наявної нестабільності генератора НВЧ. На рис. 3 приведено один із варіантів адаптації структури прийомо-передавача імпульсної РЛС, що передбачає узгоджену обробку радіолокаційних

сигналів з внутрішньою модуляцією. При цьому, як видно з рисунку, в якості внутрішньої модуляції передбачається використання наявної нестабільності амплітуди і частоти зондуючого радіолокаційного сигналу при формуванні.

Для цього, в алгоритмі роботи імпульсної РЛС, етап очікування замінюється етапом узгодження приймача, що полягає в детектуванні амплітудної і частотної нестабільності радіолокаційного сигналу в поточному періоді зондування, з подальшим розрахунком параметрів узгодженого алгоритму (узгодженого фільтру).

В результаті таких операцій, до моменту включення приймача, відбувається налаштування спеціально введеного узгодженого фільтру відповідно наявної випадкової форми модулюючих складових в поточному періоді зондування. Таким чином, навіть використовуючи найпростіший шлях синтезу узгодженого фільтру [4], його відгуком буде автокореляційна функція комплексної обвідної зондуючого сигналу. Тому, для визначення потенційного виграшу від застосування запропонованого підходу, необхідно оцінити можливе трансформування кореляційних властивостей радіолокаційного сигналу, що відбувається в наслідок урахування внутрішньої кутової і частотної нестабільності як модуляції.

У загальному випадку, математична модель імпульсного радіолокаційного сигналу у може бути представлена у вигляді:

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (1)$$

або в комплексному вигляді

$$u(t) = \operatorname{Re} \left[U(t) \exp(j\omega_0 t) \exp(j\varphi(t)) \exp(j\varphi_0) \right], \quad (2)$$

де $U(t)$ – амплітудна модулююча складова; $\varphi(t)$ – кутова модулююча складова; φ_0 – початкова фаза несучого коливання; ω_0 – частота несучого коливання.

Для спрощення аналізу, перейдемо до комплексної обвідної, при цьому знехтувавши початковою фазою, яка в приведеному вище алгоритмі не відіграє вагомій ролі, з огляду на часову інваріантність узгодженого фільтру:

$$\underline{U}(t) = U(t) \exp(j\varphi(t)). \quad (3)$$

З виразу видно, що отримана модель містить дві модулюючі складові – модулюючий сигнал по амплітуді і модулюючий сигнал по фазі або частоті, які в сукупності і визначають форму комплексної обвідної сигналу і її кореляційні властивості.

Якщо не враховувати внутрішню модуляцію радіолокаційного сигналу, то його кореляційні властивості визначаються лише тривалістю, оскільки $\varphi(t) = 0$; $U(t) = U_0 \left(\sigma(t) - \sigma(t - \tau_i) \right)$ для $t \geq 0$ (де $\sigma(x)$ – функція Хевісайда).

Враховуючи імпульсну дію генератора НВЧ, незалежно від того присутні амплітудні флуктуації чи ні, радіолокаційний сигнал залишається фінітним [2], а отже, для коректності постановки задачі, необхідно ввести ще одну функцію $\xi(t)$ нормовану за амплітудою і ширина спектру якої співрозмірна із шириною спектру $U(t)$. Отже, комплексна обвідна сигналу прийме вигляд:

$$\underline{U}(t) = U(t) \xi(t) \exp(j\varphi(t)). \quad (4)$$

Враховуючи різні можливі варіації форм $\xi(t)$, $\varphi(t)$ та велику множину значень їх параметрів, розглянемо притаманні імпульсним радіолокаційним системам випадки [2]. Враховуючи конструктивні та функціональні особливості передавачів імпульсних радіолокаційних станцій, при модуляції НВЧ коливаль, форма амплітудної обвідної може бути у вигляді прямокутного імпульсу

$$\xi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & t < 0, t > \tau_i, \end{cases} \quad (5)$$

або дзвоноподібного

$$\xi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{(t - \eta_u \tau_i)^2}{2\sigma_u^2}\right), \quad (6)$$

де σ_u - параметр, що характеризує ступінь згладжування фронтів імпульсу; η_u - параметр, що характеризує зміщення центру гаусівського зважуючого імпульсу відносно половини тривалості радіолокаційного сигналу (якщо зважуюча функція центрована, то при $0 \leq t \leq \tau_i$, $\eta_u = 1/2$).

Внутрішня кутова модуляція радіолокаційного сигналу може бути у вигляді лінійної частотної модуляції

$$\varphi(t) = bt^2, \quad (7)$$

параболічної частотної модуляції

$$\varphi(t) = ct^3, \quad (8)$$

або у вигляді моно чи полігармонійної функції

$$\varphi(t) = \Delta\omega \int_0^t \sum_i u_i \sin(\Omega_i x + \varphi_i) dx, \quad (9)$$

де b - коефіцієнт лінійної частотної модуляції [4]; c - коефіцієнт параболічної модуляції [3]; $\Delta\omega$ - девіація частоти; u_i, Ω_i, φ_i - амплітуда, частота і початкова фаза відповідно, гармонійних складових полігармонійної функції частотної модуляції.

З метою аналізу потенційного виграшу від застосування такого підходу, доцільно скористатись комплексною характеристикою сигналу – функцією невизначеності [3, 4]. Провівши підстановки та виконавши математичні перетворення вирази функцій невизначеності приймають вигляд:

$$\begin{aligned} & \text{- з прямокутною обвідною без частотної модуляції:} \\ & \hspace{15em} (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{- з прямокутною обвідною і лінійно-частотною модуляцією:} \\ & \chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{\sin[b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)]}{b\tau(\tau_i - |\tau|) - \pi\Omega(\tau_i + |\tau|)} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right), & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i; \\ 0 & \text{при інших } \tau; \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{- з прямокутною обвідною і параболічною частотною модуляцією:} \\ & \chi(\tau, \Omega) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_i} \sqrt{\frac{\pi}{6c\tau}} \left[(C_1 + C_2)^2 + (S_1 + S_2)^2 \right], & -\tau_i \leq \tau \leq \tau_i; \\ 0 & \text{при інших } \tau; \end{cases} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\text{де } C_n = \int_0^{x_n} \cos(\pi y^2) dy; \quad S_n = \int_0^{x_n} \sin(\pi y^2) dy; \quad \left. \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} \right\} = -\sqrt{\frac{\pi}{6c\tau}} \Omega \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6c\tau}{\pi}} (\tau_i - |\tau|).$$

На рис. 4 і рис. 5 приведено результати моделювання функції невизначеності, та її частотні перерізи відповідно отриманих виразів. Параметри моделі сигналу задані в межах характеристик типового тракту НВЧ імпульсної РЛС.

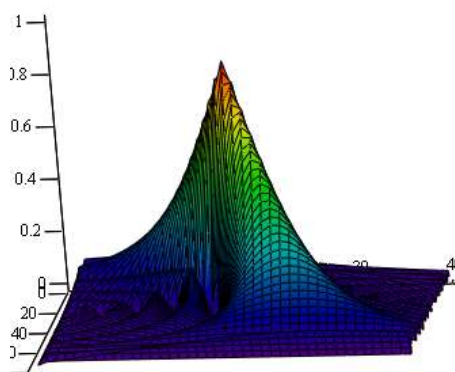


Рис. 4. Функція невизначеності імпульсного радіолокаційного сигналу при урахуванні частотної модуляції

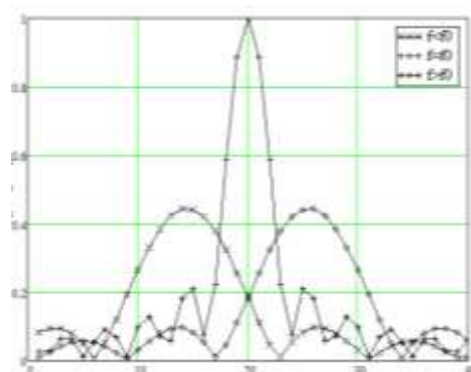


Рис. 5. Переріз функції невизначеності імпульсного радіолокаційного сигналу при урахуванні частотної модуляції для різних доплерівських частот

Таблиця 1

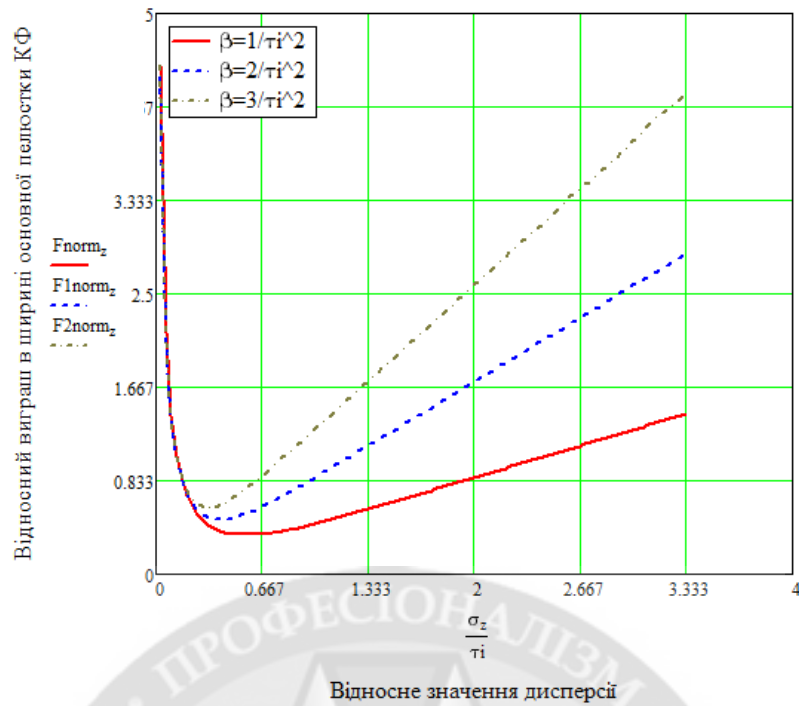
Аналitичні вирази функцій невизначеності імпульсних радіолокаційних сигналів з дзвоноподібною обвідною

Тип модуляції	Аналitичний вираз
з дзвоноподібною обвідною без частотної модуляції:	$\chi(\tau, \Omega) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2 \Omega^2 \sigma_u^2 \right) \right]$
з дзвоноподібною обвідною і лінійно-частотною модуляцією:	$\chi(\tau, \Omega) = \exp \left[-\frac{\frac{\tau^2}{2\sigma_u^2} + 2\pi^2 \sigma_u^2 \left(\Omega + b\tau/\pi \right)^2}{2} \right]$
з дзвоноподібною обвідною і параболічною частотною модуляцією:	$\chi(\tau, \Omega) = \exp \left[\frac{\exp \left(-\frac{\tau^2}{\sigma_u^2} - \frac{2\pi^2 \Omega^2}{\sigma_u^4 - 9c^2 \tau^2} \right)}{\sqrt[4]{1 + \left(3c\sigma_u^2 \right)^2 \tau^2}} \right]$

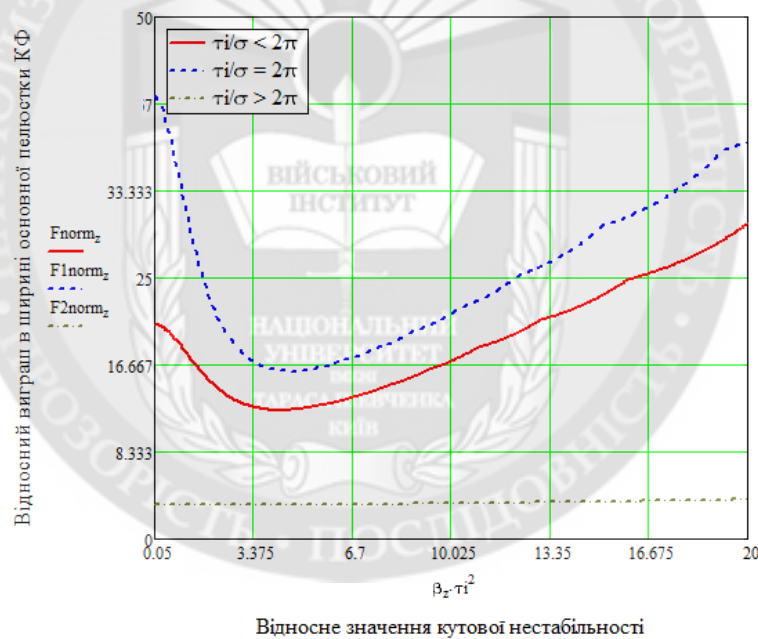
Як видно із рисунків, урахування навіть незначної частотної модуляції в радіолокаційному сигналі відкриває можливість значно поліпшити характеристики системи за основними показниками, при цьому, без необхідності удосконалення передавача.

Більш адекватним, для імпульсних радіолокаційних засобів є випадок, коли амплітудна обвідна радіоімпульсу має не прямокутну а дзвоноподібну форму [2]. Вирази функцій невизначеності для різних комбінацій випадкових амплітудних і частотних складових приведені в табл. 1.

Аналізуючи отримані вирази можна прийти до висновку, що вплив параметрів різних модулюючих складових не тільки відчутний а і нелінійний.



а)



б)

Рис. 6. Залежність відносного виграшу в ширині основної пелюстки КФ імпульсного радіосигналу з урахуванням гаусівської форми амплітудної обвідної та ЛЧМ від параметрів а) амплітудної і б) частотної модуляції

На рис. 6 а і б приведено залежності відносного виграшу в ширині основної пелюстки функції невизначеності радіолокаційного сигналу від різних значень параметрів модуляції для випадку дзвоноподібної амплітудної обвідної і ЛЧМ. Як видно з цих графіків, за наявності обох флуктуаційних складових, існують такі їх співвідношення, при яких досягаються або виграш або втрата в ефективності розрізнення не зважаючи на розмах цих нестабільностей.

Висновки. В реальних імпульсних радіолокаційних системах величина амплітудних та частотних флуктуацій зондуючих сигналів може сягати декількох відсотків [4], що при реалізації кореляційних методів обробки ехо-сигналів відкриває потенційні можливості збільшення характеристик виявлення. Крім того, як показує аналіз отриманих виразів функцій невизначеності, властивості зондуючих сигналів значно залежать не тільки від виду законів розподілу флуктуацій, але і від параметрів цих законів.

Легко можна показати, що запропоновані підходи дають змогу покращити не тільки роздільну здатність радіолокаційних систем, а і підвищити їх завадостійкість за рахунок підвищення когерентності обробки радіолокаційних сигналів. Важливо зазначити, що запропонований метод не потребує удосконалення прийомо-передавача системи, що для імпульсних радіолокаційних засобів є безальтернативним шляхом модернізації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография/ Под редакцией А.В.Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512с.
2. Передающие устройства СВЧ: Учебное пособие для радиотехнических спец. вузов /Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А.; под ред. М.В. Вамберского – М.: Высш. шк., 1984. – 448 с.
3. Кравченко В.Ф. Алгебра логики, атомарне функції и вейвлеты в физических приложениях/ Кравченко В.Ф., Рвачев В.Л. . – М.: ФИЗМАЛИТ, 2006. – 416 с.
4. Levanon N Radar Signals /Nadav Levanon, Eli Mozeson.-New Jersey:John Wiley & Sons ,2004. – 411 p.

REFERENCES:

1. Voprosy perspektivnoy radiolokatsii. Kollektivnaya monografiya/ Pod redaktsiey A.V.Sokolova. – М.: Radiotekhnika, 2003. – 512s.
2. Peredayushchie ustroystva SVCh: Uchebnoe posobie dlya radiotekhnicheskikh spets. vuzov /Vamberskiy M.V., Kazantsev V.I., Sheluhin S.A.; pod red. M.V. Vamberskogo – М.: Vyssh. shk., 1984. – 448 s.
3. Kravchenko V.F. Algebra logiki, atomarne funktsii i veyvletyi v fizicheskikh prilozheniyah/ Kravchenko V.F., Rvachev V.L. . – М.: FIZMALIT, 2006. – 416 s.
4. Levanon N Radar Signals /Nadav Levanon, Eli Mozeson. New Jersey:John Wiley & Sons, 2004. – 411 p.

Рецензент: д.т.н., проф. Андрощук О. С., начальник докторантури Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

д.т.н., проф. Шинкарук О.Н., к.т.н., доц. Чесановский И.И., Левчунец Д.А.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Исследованы потенциальные возможности использования импульсных зондирующих сигналов в когерентных радиолокационных каналах с согласованной обработкой сигналов.

Получен ряд аналитических выражений для функции неопределенности, которые позволяют связать угловую нестабильность и неточность воспроизведения амплитудной огибающей с потенциальным выигрышем в разрешении как по пространственным координатами, так и по доплеровским смещениям частоты. В ходе анализа полученных выражений показано, что существует нелинейная зависимость параметров функции неопределенности и параметров радиолокационных сигналов. Исходя из этого, обоснована необходимость решения задачи оптимизации при формировании алгоритма обнаружения и различения в приемнике.

На основании полученных результатов показано, что импульсные радиолокационные сигналы без внутренней модуляции могут быть основой когерентных систем с высоким разрешением, при использовании их внутренних угловых и амплитудных нестабильностей в качестве модулирующих компонент. Для практической реализации идеи, предложен вариант

построения структурной схемы приемника импульсной радиолокационной системы, который обеспечивает согласованную обработку радиолокационных сигналов со случайной внутренней модуляцией. Показано, что имеющейся нестабильности частоты импульсных генераторов СВЧ достаточно, чтобы рассматривать ее в качестве внутренней модуляции сигнала при условии предварительного детектирования его формы при формировании сигналов в каждом периоде зондирования.

Анализируя функции неопределенности импульсных радиолокационных сигналов с типовыми формами комплексной огибающей показано, что при наличии одновременно амплитудной и частотной модуляций существует их соотношение, при котором происходит усиление или потеря эффекта от их учета. Исходя из этого показано, что при проектировании импульсных радиолокационных систем, важно учитывать внутреннюю нестабильность импульсных радиолокационных сигналов, чтобы предотвратить чрезмерную потерю разрешения и точности измерения координат.

Приведены результаты моделирования, которые показывают, что предложенный алгоритм позволяет получить существенный выигрыш в точности измерения координат и оценке доплеровских частот для этого класса радиолокационных систем. При этом, алгоритм не предусматривает внесения изменений в передатчик радиолокационной системы, что важно при модернизации.

Ключевые слова: радиолокация, фильтрация, когерентность, согласованная обработка, корреляция, функция неопределенности.

**Prof. Shyncaruk O.M., Ph.D. Chesanovskyi I.I., Levchunets D.A.
METHOD OF INCREASING THE COHERENCE OF SIGNAL PROCESSING IN PULSED
RADAR SYSTEMS**

Investigated the potential use of pulse sounding coherent radar signals in the channels of coherent signal processing.

A number of analytical expressions for the function of uncertainty that help you connect angular instability and inaccuracy reproduction amplitude envelope with a potential gain in resolution both spatial coordinates and on the Doppler shift frequency. It is shown that there is a nonlinear dependence function parameters uncertainty and volatility parameters of radar signals. Consequently, there is a need to solve the optimization problem in the formation of the algorithm identifying and distinguishing the receiver system.

Based on the results shown that pulsed radar signals without internal modulation can be the basis of coherent systems with high resolution when using their internal angular and amplitude instabilities as modulating components.

For the practical realization of the idea, proposed an option of constructing block diagram transceiver pulsed radar, which provides a coherent processing of radar signals with internal modulation.

It is shown that at normal frequency instability microwave generator, it can be used as internal modulation signal. For this internal frequency and amplitude modulation radar signals must first be detected. Romozhlyvist using existing instability amplitude and frequency radio signal that occurs during its formation.

It is shown that the presence of amplitude modulation and frequency modulation, there are their ratio, at which the gain or loss in performance or distinction despite these amplitude modulations. Therefore, when designing pulsed radar systems, it is important to have regard to the formation of unstable signals, to prevent excessive loss in resolution radar systems and precision measurement of target coordinates.

The simulation results show the proposed algorithm significant gain in accuracy coordinate measurement and precision measurement of the Doppler frequency shift in this class radar systems. However, the algorithm does not involve changes in transmitter radar system, which is important when modernizing impulse radar.

Keywords: radar, filtration, coherence, coherent processing, correlation, ambiguity function.