

УДК 621.396.96

О. М. ШИНКАРУК, доктор технічних наук, професор, академік Академії наук прикладної радіоелектроніки – проректор з організації діяльності, контролю та перспективного розвитку, завідувач кафедри радіотехніки та зв'язку Хмельницького національного університету (м. Хмельницький)

І. І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки та зв'язку Хмельницького національного університету (м. Хмельницький)

А. В. ІВАНОВ, старший викладач кафедри зв'язку, автоматизації та захисту інформації Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького (м. Хмельницький)

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ МОДУЛЯЦІЙНИХ СКЛАДОВИХ ІМПУЛЬСНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ НА СТУПІНЬ ЇХ РОЗРІЗНЕННЯ

У статті розглянуто один із шляхів підвищення ступеня розрізнення зондуючих радіолокаційних сигналів, який є альтернативним до існуючих і базується на застосуванні недетермінованих амплітудних і кутових модуляційних складових у сигналі, як когерентної ознаки в межах періоду зондування. Крім того, показано, що потенційні властивості імпульсних радіолокаційних сигналів щодо розрізнення значно вищі, ніж ті, які в них закладаються при модуляції, що пояснюється наявністю флуктуаційних

складових у несучому коливанні, які за відомої форми можуть сприйматись як корисна модуляція.

Ключові слова: модуляція, імпульсні радіолокаційні сигнали, зонduючий сигнал.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Розвиток радіолокації як окремої науки постійно супроводжувався пошуком ідеальних (оптимальних) методів і засобів отримання інформації про об'єкти спостереження. Ключову роль у цьому процесі відіграла, у першу чергу, розробка досконалих моделей зонduючих сигналів, оскільки саме їх властивості визначали потенційні можливості систем загалом. Паралельно до розвитку теорії сигналів створювались і методи їх обробки, проте майже завжди вони на практиці не давали змоги реалізовувати ті потенційні можливості, що закладались у сигналах. Значним проривом у цій частині стала розробка й упровадження цифрових методів обробки сигналів, що майже зняли обмеження на потенційні можливості приймальних засобів як стосовно виявлення, так і щодо розрізнення, і в результаті потенційні обмеження на характеристики радіолокаційних систем накладаються вже потенційними можливостями сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор. На сьогодні розроблено велику кількість ефективних моделей сигналів [2; 3], які відрізняються за модуляційними й енергетичними властивостями, володіють високими можливостями в порівнянні з простими сигналами, проте потребують застосування спеціальних засобів для їх синтезу. Саме через проблемність реалізації складних сигналів у НВЧ діапазоні значна частина сучасних радіолокаційних засобів будуються з використанням мало-ефективних простих зонduючих сигналів. Це накладає значні обмеження на характеристики засобів загалом і призводить до подальшого віддалення ефективності методів обробки і потенційних можливостей засобів формування сигналів, що обумовлює необхідність пошуку нових інженерних рішень при побудові радіолокаційних засобів як цілісних систем.

Метою статті є розробка та дослідження математичної моделі радіолокаційного зонduючого сигналу, що адекватна впливу флуктуаційних процесів діючих у модуляторах і генераторах НВЧ. Для досягнення мети в роботі необхідно проаналізувати та теоретично узагальнити математичну модель зонduючого радіолокаційного сигналу з урахуванням недетермінованих до початку періоду зондування амплітудних і кутових флуктуаційних складових.

Виклад основного матеріалу дослідження. Теоретично можливості щодо розрізнення радіолокаційних сигналів визначаються шириною їх частотного спектра. У випадку застосування простих імпульсних радіолокаційних сигналів ширина їх спектра визначається шириною першої пелюстки спектра, у якій сконцентровано більше 90 відсотків потужності, а отже, є обернено пропорційною тривалості зонduючого сигналу. Проте, як показує аналіз структур імпульсних радіолокаційних систем, ширина частотної смуги пропускання приймачів завжди приймається в декілька разів ширшою. Це пов'язано з тим, що імпульсні генератори НВЧ володіють достатньо високою нестабільністю частоти, розмах якої як короткочасно, так і тривало може значно перевищувати ширину спектра самого сигналу. З одного боку, такий підхід дає змогу реалізувати максимальну частку енергії сигналу, а з іншого – пропорційно збільшується енергія шумів і завад, що діють на вході приймача. Очевидно, що він є неоптимальним, проте в умовах існуючої недетермінованості флукуаційних кутових складових (особливо стосовно короткочасної частотної нестабільності) з урахуванням короткої тривалості самих зонduючих імпульсів і неможливості більшої стабілізації він є єдиним можливим.

У дійсності потенційно можливий інший підхід. Якщо сприймати наявні короткочасні частотні флукуації як корисну кутову модуляцію, реальні потенційні можливості зонduючих сигналів, як показано в низці робіт [1; 4; 5], стають значно вищими. Його реалізація можлива з тих міркувань, що передавач сигналу та приймач змонтовані в одному пристрої, їх робота синхронізована в часі і необхідно лише їх синхронізувати за модуляцією. У роботі [4] запропоновано структуру пристрою, алгоритм роботи якого дає змогу це реалізувати, проте не проведено достатньої оцінки потенційного виграшу, що може бути отриманий від його застосування.

Для оцінки потенційного виграшу, у першу чергу, необхідно проаналізувати фізичні процеси, що відбуваються в генераторі НВЧ під час його роботи, і сформулювати адекватну їм математичну модель зонduючого радіосигналу.

При певних допущеннях та обмеженнях, з урахуванням дії дестабілізуючих факторів у передавачі, узагальнену математичну модель обмеженого в часі та на частотній осі зонduючого сигналу може бути подано у вигляді

$$S(t) = S(\chi_s(t), t) \cos(\omega_0 t + \varphi(\chi_\varphi(t), t)), \quad (1)$$

де $S(\chi_s(t), t)$ – амплітудна модулююча складова; $\chi_s(t)$ – закон розподілу амплітудної флукуційної складової; $\varphi(\chi_s(t), t)$ – кутова модулююча складова; $\chi_\varphi(t)$ – закон розподілу кутової флукуційної складової.

У випадку, коли радіолокація здійснюється простими імпульсними зондуючими радіосигналами, в яких відсутня кутова модуляційна складова, а амплітудна модуляція здійснюється імпульсами прямокутної форми

$$\varphi(\chi_\varphi(t), t) = \varphi_0 + \chi_\varphi(t);$$

$$S(\chi_s(t), t) = S(t)\chi_s(t) = \begin{cases} S_0\chi(t), & |t| \leq \tau; \\ 0, & |t| > \tau. \end{cases},$$

вираз (1) набуде вигляду

$$S(t) = \begin{cases} S_0\chi(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \chi_\varphi(t)), & |t| \leq \tau; \\ 0, & |t| > \tau. \end{cases} \quad (2)$$

Оскільки кореляційні властивості сигналу визначаються формою їх комплексної обвідної, запишемо вираз (2) у комплексному вигляді та виділимо при цьому комплексну обвідну

$$s(t) = \operatorname{Re}\{s(t)\} = \operatorname{Re}\{S e^{j\omega_0 t}\},$$

$$s(t) = S_0\chi_s(t) e^{j\omega_0 t} e^{j(\varphi_0 + \chi_\varphi(t))}, |t| \leq \tau. \quad (3)$$

Для спрощення подальшого викладення припустимо, що $S_0 = 1, \varphi_0 = 0$. Отже, вираз (3) набуде вигляду

$$s(t) = \chi_s(t) e^{j\omega_0 t} e^{j\chi_\varphi(t)}, |t| \leq \tau. \quad (4)$$

Кореляційна функція комплексної обвідної такого сигналу буде мати вигляд

$$B(\tau) = \int_{-\frac{\tau}{2} + \tau}^{\frac{\tau}{2}} S(t)S(t-\tau)dt = \int_{-\frac{\tau}{2} + \tau}^{\frac{\tau}{2}} \chi_s(t)\chi_s(t-\tau) e^{j([\chi]_\varphi(t) - \chi_\varphi(t-\tau))} dt. \quad (5)$$

За відсутності флуктуаційних складових або при їх неврахуванні кореляційна функція комплексної обвідної з урахуванням прийнятих у (4) допущень набуде вигляду

$$B(\tau) = \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} S(t)S(t-\tau)dt = \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} dt = \tau_i - |\tau|. \quad (6)$$

При здійсненні узгодженої фільтрації в приймачі імпульсну характеристику фільтра синтезують відповідно до форми комплексної обвідної сигналу, а отже, реакція фільтра на сигнал буде його автокореляцією.

$$B(\tau) = \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} \dot{H}(t)\dot{S}(t-\tau)dt = \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} \dot{S}(\tau_i - t)\dot{S}(t-\tau)dt = \tau_i - |\tau|. \quad (7)$$

Проте за наявності в сигналі недетермінованих складових, що не враховуються при синтезі фільтра, функція автокореляції перетворюється на функцію взаємкореляції імпульсної характеристики фільтра і дійсної комплексної обвідної сигналу

$$B'(\tau) = \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} \dot{H}'(t)\dot{S}(t-\tau)dt, \quad (8)$$

де $\dot{H}'(t) \neq \dot{S}(\tau_i - t)$.

Залежно від похибки відтворення обвідної при формуванні зондуємого радіосигналу буде змінюватись форма відгуку узгодженого фільтра, який фактично визначається виглядом взаємкореляційної функції (8). Оскільки на практиці амплітудні та кутові випадкові процеси в зондуємому НВЧ сигналі є статистично незалежними, для оцінки ступеня трансформування відгуку необхідно задати окремо закони розподілів випадкових величин $\chi_s(t)$ та $\chi_\varphi(t)$.

Розглянемо один з найпоширеніших випадків у роботі імпульсних генераторів НВЧ, а саме коли $\chi_s(t)$ представляє реакцію RC-кола з постій-

ною часу T на імпульс прямокутної форми, що притаманно спотворенням, які вносяться в модулюючий імпульс паразитними реактивностями в модуляторі і характеризуються тривалістю фронтів імпульсу та нерівномірністю вершини, а $\chi_\varphi(t)$ може бути апроксимована певним лінійним законом, що притаманно більшості імпульсних генераторів НВЧ через залежність частоти від зміни керуючої напруги та напруги живлення.

Отже:

$$\chi_s(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \sigma(t) - \left(1 - e^{-\frac{t-\tau_i}{T}}\right) \sigma(t - \tau_i), \quad (9)$$

де $\sigma(t)$ – функція Хевісайда.

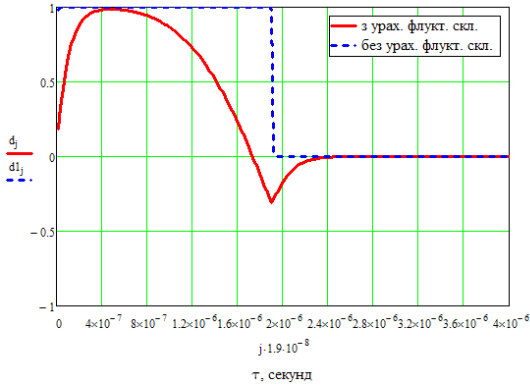
$$\chi_\varphi(t) = bt^2. \quad (10)$$

Якщо підставити вирази (9) та (10) в (4), комплексна обвідна зондуємого сигналу набуде вигляду

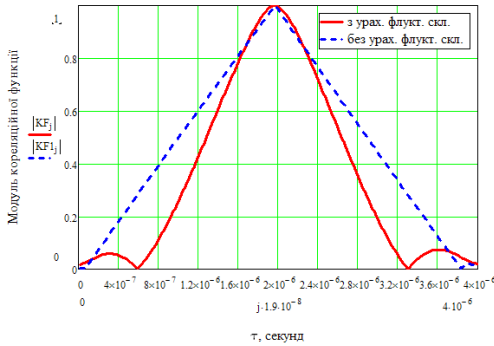
$$\dot{s}(t) = \left(\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \sigma(t) - \left(1 - e^{-\frac{t-\tau_i}{T}}\right) \sigma(t - \tau_i) \right) e^{jbt^2}. \quad (11)$$

Залежно від параметрів розподілів, а саме постійної часу T і коефіцієнта крутизни частотної модуляції b , ефективність алгоритму оптимальної обробки буде різною, оскільки від їх величини залежить ступінь “узгодженості” перехідної характеристики фільтра і сигналу. На рис. 1 показано залежності форми комплексної обвідної та її автокореляційної функції за незначних кутових та амплітудних спотворень, а саме при затягуванні фронтів імпульсу на рівні 5 % і відносної нестабільності частоти генератора НВЧ на рівні $1,5 \cdot 10^{-5}$, спостерігається значна деформація форми комплексної обвідної і зменшення інтервалу кореляції на 10–15 %.

Для імпульсних генераторів НВЧ таку стабільність забезпечити достатньо складно. Так, імпульсні генератори НВЧ магнетронного типу, що використовуються в більшості імпульсних радіолокаційних засобів, мають відносну стабільність частоти на рівні $1 \cdot 10^{-3}$, а модулятори забезпечують тривалість фронтів на рівні 20–30 % від тривалості імпульсів. Для такого випадку (рис. 2) спостерігається значна зміна комплексної обвідної, і зменшення її інтервалу кореляції вимірюється вже десятками разів.



а



б

Рис. 1. Зміна форми комплексної обвідної (а) та автокореляційної функції (б), сигналу при урахуванні амплітудних і кутових флуктуаційних складових $\delta f = 1 \cdot 10^{-5}$, $T = 0,05\tau_i$ (радіотехнічні системи з високостабільними генераторами НВЧ)

Якщо співставити такі властивості зондуєчих сигналів і алгоритм їх узгодженої обробки, що не враховує наявність випадкових флуктуаційних складових, форма відгуку узгодженого фільтра буде формуватись, виходячи з форми амплітудної обвідної, і не буде містити кутових флуктуаційних складових, проте при застосуванні квадратурного детектора або квадратурного дискретизатора ці складові будуть призводити до появи бокових пелюсток, амплітуди яких обмежені формою автокореляційної функції по амплітудній обвідній

$$B(t) = \int_{-\frac{\tau i}{2} + \tau}^{\frac{\tau i}{2}} \dot{S}(t)\dot{S}(t-\tau)e^{jb(t-\tau)^2} dt = (\tau_i - |\tau|)f(b, \tau) \quad (12)$$

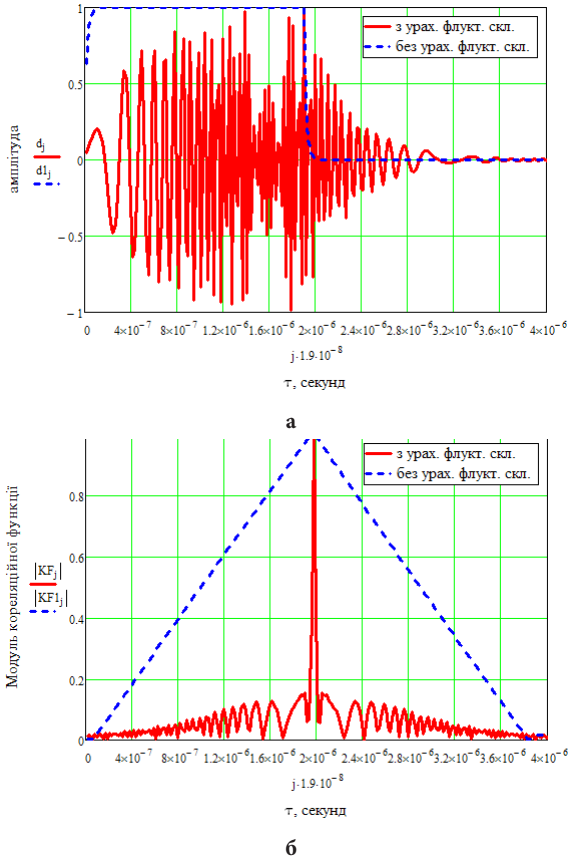


Рис. 2. Зміна форми комплексної обвідної: а – кореляційних властивостей; б – сигналу при урахуванні амплітудних і кутових флуктуаційних складових $\delta f = 1 \cdot 10^{-3}$, $T = 0, 2\tau$

Фактично в приймачі відбувається обробка сигналу, з яким він узгоджений лише частково, що призводить до появи спотворень у відгуку, для усунення яких, як правило, застосовують алгоритми (схеми) компенсації нестабільностей передавача. Проте, як видно з рис. 2, наявність кутових та амплітудних спотворень призводить до значного скорочення інтервалу автокореляції зондуючих сигналів, що при синтезі відповідної перехідної характеристики узгодженого фільтра потенційно збільшує ступінь їх розрізнення.

Висновок. Реалізуючи смугу частот приймача повною мірою через урахування додаткової модуляції в радіосигналі виграш за роздільною здатністю та відношенням сигнал/шум може скласти декілька десятків разів без внесення змін у зондуючі сигнали і без ускладнення передавача. Проте недетермінована природа модуляції вимагає застосування додаткових алгоритмів обробки, а саме постійної (динамічної поза межами періоду зондування) адаптації перехідної характеристики узгодженого пристрою обробки в приймачі. Слід зауважити, що за такого підходу потенційні можливості розрізнення сигналів також обмежені, але вже не їх тривалістю, а шириною смуги пропускання приймача та законами розподілу флуктуаційних складових в амплітудній та фазовій обвідних.

Список використаної літератури

1. Вопросы перспективной радиолокации : монография / под редакцией А. В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003 – 512 с.
2. Вамберский М. В. Передающие устройства СВЧ : учебное пособие для радиотехнических спец. вузов / М. В. Вамберский, В. И. Казанцев, С. А. Шелухин ; под ред. М. В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.
3. Кравченко В. Ф. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях / В. Ф. Кравченко, В. Л. Рвачев. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2006. – 416 с.
4. Шинкарук О. М. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньо-імпульсних фазочастотних нестабільностей / О. М. Шинкарук, І. І. Чесановський // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка ; за ред. С. В. Ленкова. – К. : ВІКНУ, 2009. – Вип. № 17. – С. 89–92.
5. Чесановський І. І. Трансформування функції невизначеності радіосигналів з урахуванням внутрішньо-імпульсної фазочастотної нестабільності / І. І. Чесановський // Збірник наукових праць № 50; за ред. В. О. Балашова. – Хмельницький : НАДПСУ, 2009. – № 50. – С. 58–62.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2013.

Шинкарук О. Н., Чесановский И. И., Иванов А. В. **Определение влияния случайных модуляционных составных импульсных радиолокационных сигналов на степень их различия**

В статье рассмотрен один из путей повышения степени различия зондирующих радиолокационных сигналов, который является альтернативным к существующим и базируется на применении недетерминированных амплитудных и угловых модуляционных составляющих в сигнале, как когерентного признака в пределах периода зондирования. Кроме того, показано, что потенциальные свойства импульсных радиолокационных сигналов по различию намного выше тех, которые в них закладываются при модуляции, что объясняется наличием флуктуационных составляющих в несущем колебании, которые в известной форме могут восприниматься как полезная модуляция.

Ключевые слова: *модуляция, импульсные радиолокационные сигналы, зондирующий сигнал.*

Shynkaruk O. M., Chesanovskyi I. I., Ivanov A. V. **Determination of influence of random modulation components of impulse radar signals on the degree of their recognition**

The article touches upon one of the ways to increase the degree of recognition of the probing radar signals which is an alternative one to existing ways and it is based on the application of non-determined amplitude and angular modulation components of the signal as a coherent feature within the period of probation. Besides it is shown that the potential properties of impulse radar signals of recognition are much higher than those that are laid during the modulation. The phenomenon is explained with the presence of fluctuation components in the carrier wave that can be perceived as useful modulation.

Keywords: *modulation, impulse radar signals, probing signal.*