

УДК 621.391

О.В. Кувшинов¹, А.В. Шишацький², В.В. Лютов³, О.Г. Жук¹¹ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ² ЦНДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ³ Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ СКРИТНОСТІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано шляхи підвищення структурної скритності сигналу OFDM, проведено оцінку потенціальної скритності сигналу OFDM з додатковим розширенням спектру за допомогою квазіортогональних псевдовипадкових послідовностей та методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти.

Ключові слова: засіб радіозв'язку, широкосмуговий сигнал, структурна скритність, арсенал сигналів.

Вступ

Однією з важливих характеристик систем і засобів радіозв'язку, які функціонують в умовах радіоелектронного подавлення є їх скритність. Під скритністю розуміють здатність систем і засобів радіозв'язку протистояти дії радіотехнічної розвідки [1–4].

Радіотехнічна розвідка передбачає послідовне виконання трьох основних задач: виявлення факту роботи системи (засобу) радіозв'язку (виявлення сигналу); визначення структури виявленого сигналу і його основних параметрів; розкриття інформації, яка міститься в сигналі. Відповідно до цих задач можна визначити основні види скритності: енергетичну, структурну, інформаційну просторову і часову.

Структурна скритність спрямована на виключення або суттєве утруднення розкриття структури (виду) сигналів системи (засобу) радіозв'язку.

Одним з основних методів підвищення структурної скритності є використання широкосмугових сигналів з великою базою. Оцінка потенційної скритності різних видів сигналів, які застосовуються в радіозв'язку проведена в [4–5].

Так, в [2–5] отримано вирази для потенційної структурної скритності широкосмугових сигналів на основі M -послідовностей, сегментів M -послідовностей, сигналів у вигляді випадкових двійкових послідовностей, багатопозиційних імпульсних послідовностей на основі реалізації шуму. В [3] оцінена структурна скритність сигналів з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти (ППРЧ). Але в сучасних безпроводових стандартах [5–7] використовуються складні види широкосмугових сигналів, такі як сигнали OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням) у поєднанні з ППРЧ, та сигнали OFDM з додатковим розширенням спек-

тру за допомогою квазіортогональних псевдовипадкових послідовностей.

Метою роботи є оцінка потенціальної структурної скритності сигналу OFDM з додатковим розширенням спектру за допомогою квазіортогональних псевдовипадкових послідовностей та методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти.

Виклад основного матеріалу статті

Методика розрахунку потенційної структурної скритності, що не потребує знання алгоритму розкриття сигналу на станції радіотехнічної розвідки, дана в роботі [2]. Структурна скритність визначається кількістю двійкових вимірювань, які необхідно провести для розкриття структури сигналу. Загальний вираз для потенційної скритності має вигляд

$$S = \log_2 A, \quad (1)$$

де A – кількість (арсенал) всіх можливих значень якого-небудь параметра сигналу.

Таким параметром може бути несуча частота, структура коду, час приходу сигналу тощо.

У загальному випадку скритність залежить від способу побудови конкретного виду сигналу. А кількість всіх можливих значень параметра сигналу дорівнює його базі [2–3]

$$A = B = \Delta F T, \quad (2)$$

де ΔF – ширина спектра сигналу;

T – тривалість сигналу.

Сигнали з OFDM широко використовуються в сучасних системах радіозв'язку [5–9]. Ідея ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по множині частотних підканалів і передача ведеться паралельно у всіх цих підканалах. Сигнал OFDM являє собою систему з багатьма піднесучими, засновану на використанні швидкого пере-

творення Фур'є при формуванні сигналу при передачі та демодуляції при прийманні.

У загальному випадку вираз для OFDM-сигналу записується таким чином [5; 8; 10]:

$$A_{\Sigma}(t) = \sum_{p=0}^{N-1} A_p \cos \left[2\pi f_0 t + \left(p - \frac{N-1}{2} \right) \Delta f_p t + \varphi_p \right], \quad (3)$$

де f_0 – центральна частота групового сигналу;

N – кількість піднесучих;

Δf_p – рознесення частот між піднесучими;

A_p – амплітуда p -ї піднесучої;

φ_p – поточна фаза p -ї піднесучої.

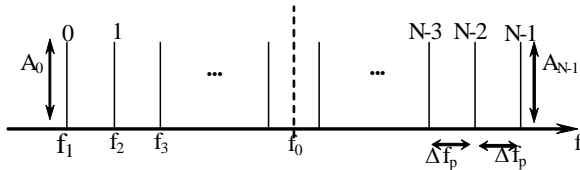


Рис. 1. Спектр сигналу OFDM

Схематичне подання сигналу OFDM у частотній області показано на рис. 1. Амплітуди A_p і фази φ_p групового сигналу (3) визначаються характером модуляції та інформацією, переданою по каналу зв'язку.

Наприклад, при передачі сигналів з фазовою модуляцією амплітуди є константами, а фази – випадковими величинами. Статистичні властивості ансамблю величин φ_p визначаються характером переданої інформації. Якщо джерело інформації має високу ентропію, і в системі не використовується завадостійке кодування, то випадкові величини φ_p можна вважати незалежними і рівномірно розподіленими на інтервалі $(0 \dots 2\pi)$.

Оцінимо структурну скритність сигналу OFDM. База сигналу OFDM приблизно дорівнює кількості від несучих N . Потенційна скритність сигналу при цьому є досить низькою і дорівнює $S_{\text{OFDM}} = \log_2 N$.

Арсенал сигналів OFDM можна підвищити такими способами.

1. Посимвольна перестановка частотних підканалів зі збереженням відносності зсуву фаз. Підканали повинні змінювати своє положення за погодженою між приймачем і передавачем програмою, наприклад відповідно до генератора випадкових чисел. Кількість (арсенал) таких перестановок при N підканалах дорівнює $A_1 = N!$

2. Довільне перемеження символів інформації переданого повідомлення від одного символу OFDM до іншого.

3. Вибір розширювальної послідовності для кожної піднесучої.

Розглянемо окремий випадок такої по символьної перестановки, коли перемежування переданої

інформації здійснюється незалежно усередині кожного символу OFDM. Як і в першому випадку потрібна погодженість роботи передавача й приймача. Арсенал при цьому дорівнює $A_2 = N!$

Таким чином, вираз для скритності OFDM-сигналу при застосуванні вищерозглянутих заходів має вигляд:

$$S_{\text{OFDM}=\log_2} (N!N!) = 2 \log_2 N! . \quad (4)$$

Як видно з формули, скритність OFDM-сигналу швидко зростає зі збільшенням кількості підканалів.

В підканалах системи OFDM використовуються сигнали з багатопозиційною фазовою маніпуляцією (ФМ-М) та багатопозиційною квадратурною амплітудною маніпуляцією (КАМ-М), де $M = 2^n$ – розмірність ансамблю сигналів, $n = 2, 3, \dots, 8$ [9–14].

Для сигналів КАМ-М кількість варіантів відповідності кожної точки сигнального ансамблю символу, що складається з n біт дорівнює $M!$. Відповідно, скритність сигналів КАМ-М розраховується за формулою:

$$S_{\text{КАМ}} = \log_2 M! . \quad (5)$$

Ці значення вносять додатковий вклад у збільшення загального показника скритності сигналу OFDM. На рис. 2 наведено графіки залежностей структурної скритності сигналу OFDM-КАМ від кількості піднесучих для різних значень розмірності ансамблю сигналів.

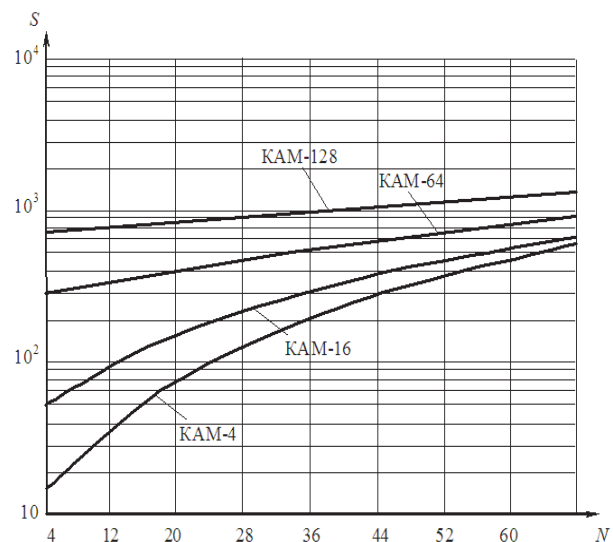


Рис. 2. Залежність структурної скритності сигналу з OFDM-КАМ від кількості піднесучих

Як видно з графіків скритність сигналу підвищується зі зростанням кількості піднесучих OFDM-сигналу. Крім того, на величину S суттєво впливає розмірність КАМ-сигналу. Але слід пам'ятати, що збільшення розмірності КАМ-сигналу призводить до погіршення завадостійкості при-

ймання сигналів. Тому в каналах з низьким відношенням сигнал/завада в основному застосовуються сигнали КАМ-4 та КАМ-16.

Врахуємо вплив на скритність структури сигналу OFDM посимвольного псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Скритність сигналу з ППРЧ обчислюється за формулою [3]:

$$S_{\text{ППРЧ}} = 0,693V_{\text{ППРЧ}} \log_2 V_{\text{ППРЧ}}, \quad (6)$$

де $V_{\text{ППРЧ}}$ – база сигналу з ППРЧ.

Арсенал складеного сигналу OFDM-КАМ з ППРЧ буде добутком арсеналів кожної складової, тому вираз загальної скритності буде сумою скритностей:

$$S_{\text{OFDM-ППРЧ}} = S_{\text{OFDM}} + S_{\text{КАМ}} + S_{\text{ППРЧ}} = 2 \log_2 M + 0,693V_{\text{ППРЧ}} \log_2 V_{\text{ППРЧ}}. \quad (7)$$

Залежності структурної скритності сигналу OFDM-КАМ-4 з ППРЧ зображено на рис. 3.

Порівняння чотирьох випадків ($N=8$, $N=16$, $N=32$; $N=64$) дозволяє зробити висновок, що при фіксованій базі сигналу для підвищення скритності варто підвищувати кількість піднесучих OFDM-сигналу та відповідно, зменшувати кількість стрибків сигналу з ППРЧ. Це пояснюється тим, що скритність сигналу OFDM приблизно в 2 рази більше скритності сигналу ППРЧ (вирази (4) і (6)).

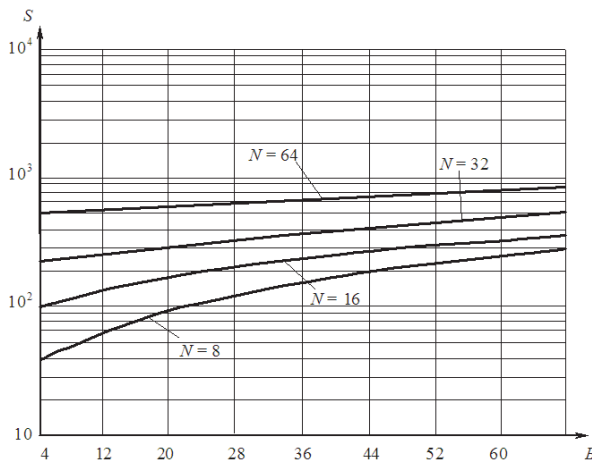


Рис. 3. Скритність сигналів OFDM з ППРЧ

Широке застосування в системах ширококутового зв'язку знайшли так звані M-последовності [13; 16]. Формування M-последовності відбувається за допомогою багатократних лінійних фільтрів у вигляді реєстрів зсуву з зворотнім зв'язком. Для формування M-последовностей з періодом $L = 2^1 - 1$ може використовуватись реєстр зсуву довжиною 1 розрядів.

Набір M-последовностей має гарні кореляційні властивості, однак має порівняно невеликий арсенал можливих варіантів $A = B = L = 2^1 - 1$. Якщо змінити розташування відводів у реєстрі зсуву, з яких

знімаються сигнали зворотного зв'язку на суматор за модулем 2, то одержимо генератор інших M-последовностей тієї ж довжини L (9.10). Кількість таких різних генераторів дорівнює:

$$\beta = \frac{\varphi(B)}{\log_2 B},$$

де $\varphi(B)$ функція Ейлера від бази сигналу (кількість цілих чисел у ряді 1,2, ..., B - 1, що взаємно простими з числом B).

Арсенал M-последовностей з урахуванням можливих варіантів реалізації їх генератора дорівнює:

$$A = B \cdot \beta(B).$$

Тоді для вираз для скритності M-последовностей має вигляд:

$$S_L = \log_2 L + \log_2 \beta(B). \quad (8)$$

Підвищення скритності арсеналу M-последовностей за рахунок комутації зворотних зв'язків у їх генераторі є порівняно невеликим. Значно ефективнішим та технічно простішим є застосування сегментів досить довгої M-последовності.

Для формування цього типу ширококутового сигналу з базою B використовується M-последовність довжиною $L \gg B$, з якої вибираються сегменти, що не перекриваються, довжиною B мікроімпульсів, які й використовуються в якості ширококутових сигналів.

В [5; 16] показано, що задовільні кореляційні властивості сегментів M-последовностей забезпечуються за умови $B > \sqrt{L/2}$.

Прийнявши в граничному випадку $B = \sqrt{L/2}$, одержимо наступний вираз для необхідної тривалості вихідної M-последовності:

$$L = 2B^2.$$

Враховуючи те, що для величини L повинна виконуватись умова $L = 2^1 - 1$. З однієї отриманої последовності можна утворити 2B сегментів. Шляхом циклічних зсувів з вихідної M-последовності можна утворити ще $L = 2B^2$ последовностей. Крім того, за рахунок різних варіантів реалізації генератора кількість можливих варіантів M-последовностей збільшується. Вираз для арсенальної скритності сегментів M-последовностей має вигляд [2]:

$$S_{\text{сегм}} L = 12 \log_2 B + \log_2 [\beta(2B^2)]. \quad (9)$$

Додаткове розширення спектру сигналу OFDM за допомогою M-последовностей створює технологію MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access). Скритність складеного сигналу OFDM-КАМ з розширенням спектру за допомогою M-последовностей можна розрахувати за формулою:

$$S_{\text{OFDM-L}} = S_{\text{КАМ}} + S_{\text{сегмL}} = 2 \log_2 N! + \log_2 M! + 12 \log_2 B + \log_2 [\beta(2B^2)] \quad (10)$$

Проте для забезпечення структурної скритності в системах MC-CDMA використовуються різні види розширюючих послідовностей: двійкові (послідовності Уолша, Шапіро-Рудіна, коди Баркера, коди Голда, M-послідовності, Адамара) та багатофазні (послідовності Френка та Задова-Чу, Мілевського, Голя).

Нижче розглянемо деякі найбільш ефективні послідовності, які використовуються в даний час.

Порівняльний аналіз цих послідовностей показав, що в системах MC-CDMA найменший пік-фактор забезпечують ідеальні багатофазні послідовності Френка, Задова-Чу, Мілевського ($P \leq 2$ (3 дБ)). Двійкові послідовності Шапіро-Рудіна забезпечують $P \leq 4$ (6 дБ). Недоліком вищеперерахованих ідеальних послідовностей є те, що об'єм їхнього алфавіту збільшується зі зростанням числа піднесучих.

Також в роботі [3] розглянуто 4-фазні послідовності Лі з одним нулем, ідеальні 8-фазні послідовності Люке з одним нулем та ідеальні 8-фазні послідовності з двома нулями. Ці послідовності також демонструють $P \leq 2$, як це зазначено в роботах [8–9].

Формування M-послідовностей відбувається за допомогою багатократних лінійних фільтрів у вигляді реєстрів зсуву зі зворотнім зв'язком. У разі формування M-послідовностей із періодом $N = 2^n - 1$ може використовуватись реєстр зсуву довжиною n. Приклад реєстру зсуву наведено на рис. 2, де каскад 1 з початковим станом 0, каскад 2 з початковим станом 0, каскад 3 з початковим станом 1.

Коди Голда мають високе значення автокореляційної функції та низьке значення кореляції. Такі властивості забезпечують можливість використання цих кодів для реалізації множинного доступу з кодовим розділенням згідно роботи [5; 13].

Проте, в зазначеній роботі ми обмежимося лише M-послідовностями, залежності структурної скритності сигналу OFDM-КАМ-4 з додатковим розширенням спектру за допомогою M-послідовностей зображено на рис. 4.

Аналіз отриманих залежностей показує, що сигнали з ППРЧ мають більший арсенал можливих значень ніж M-послідовності, і, відповідно, більшу структурну скритність.

Висновки

Таким чином, на основі проведеної оцінки структурної скритності розглянутих складних широкополосних сигналів можна зробити наступні висновки.

1. Стандартний OFDM сигнал має низьку структурну скритність. Підвищити структурну скритність OFDM сигналу можна за рахунок посимволь-

ної перестановки частотних підканалів зі збереженням відносності зсуву фаз або довільного переміщення символів інформації переданого повідомлення від одного символу OFDM до іншого.

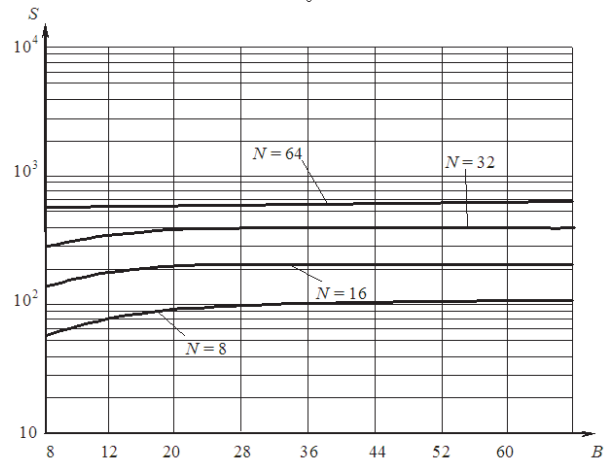


Рис. 4. Скритність сигналів OFDM з додатковим розширенням спектру за допомогою сегментів M-послідовностей

2. Скритність OFDM-сигналу підвищується зі зростанням кількості піднесучих. Крім того, на величину структурної скритності суттєво впливає розмірність ансамблю сигналів, який застосовується в підканалах системи.

3. Для підвищення структурної скритності OFDM-сигналу можна використовувати додаткове розширення спектру за допомогою M-послідовностей або псевдовипадкового перестроювання робочої частоти. Сигнали з ППРЧ мають більший арсенал можливих значень ніж M-послідовності, і, відповідно, більшу структурну скритність.

Подальші дослідження будуть спрямовані на удосконалення гібридної інформаційної технології що використовує широкополосні сигнали у поєднанні з новітніми методами просторово-часового кодування.

Список літератури

1. Теорія електричного зв'язку. Ч. 2: Основи теорії завадостійкості, кодування та інформації: підручн. / О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2008. – 286 с.
2. Каневский З.М. Теория скрyтности. Ч. 1, Основы теории скрyтности: учеб. пособ. / З.М. Каневский, В.П. Литвиненко, Г.В. Макаров. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. – 92 с.
3. Помехозащитность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Помехозащитность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.

5. Уманець Я.І. Оцінка структурної скритності широкополосних сигналів / Я.І. Уманець, О.І. Садиков // VI-й наук.-пр. семінар „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” 20 жовтня 2011 року (доповіді та тези доповідей). – К., 2011. – С. 189.

6. Кувшинов О.В. Оцінка структурної скритності широкополосних сигналів / О.В. Кувшинов, Р.М. Вознюк // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. – К.: ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2011. – Вип. 1. – С. 106-111.

7. Шишацький А.В. Аналіз напрямів підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням / А.В. Шишацький, О.Г. Жук, В.В. Лютов // Озброєння та військова техніка: наук.-техн. ж. – Х.: ХУПС. – № 4(8). – 2015. – С. 22-27.

8. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневикий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

9. Шишацький А.В. Математична модель спотворення сигналу в системах радіозв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням при впливі навислих завад / А.В. Шишацький, В.В. Лютов, М.В. Борознюк, І.Ю. Рубцов // Системи обробки інформації. – 2016. – № 3. – С. 181-186.

10. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособ. / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

11. Кувшинов О.В. Технологія OFDM: огляд проблем та шляхів їх розв'язання / О.В. Кувшинов, Т.Г. Гурський // Зв'язок. – 2008. – № 1 (77). – С. 42-46.

12. Банкет В.Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В.Л. Банкет, В.М. Дорофеев. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.

13. Alhabsi A. Spectrally Efficient Modulation and Turbo Coding for Communication Systems: Ph.D thesis / A. Alhabsi [Electronic resource]. – University of Arkansas, 2005. – P. 21-33. – Mode of access: <http://www.cs.unt.edu/~rakl/Amer05.pdf>. – Title from the screen.

14. Модульовані сигнали: навч. посіб. / В.Д. Бабиць, О.В. Кувшинов, С.П. Лівенцев, О.П. Лежнюк. – К.: КВІУЗ, 2001. – 185 с.

15. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

16. Архипкин В.Я. Псевдослучайные последовательности для систем связи CDMA. – Радиолокация, навигация и связь: 7-я Международная научно-техническая конференция / В.Я. Архипкин, Е.И. Кренгель, А.Г. Соколов. – Воронеж, апрель, 2001.

Надійшла до редколегії 24.11.2016

Рецензент: д-р техн. наук проф. І.О. Романенко, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ВОЕННОЙ РАДИОСВЯЗИ

А.В. Кувшинов, А.В. Шишацкий, В.В. Лютов, О.Г. Жук

Предложены пути повышения структурной скрытности сигнала OFDM, проведена оценка структурной скрытности сигнала OFDM с дополнительным расширением спектра с помощью квазиортогональных псевдослучайных последовательностей и методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

Ключевые слова: средства радиосвязи, широкополосный сигнал, структурная скрытность, арсенал сигналов.

ANALYSIS OF WAYS TO ENHANCE STEALTH BROADBAND SYSTEMS MILITARY RADIO

A. Kuvshinov, A. Shishatskiy, V. Lutov, O. Zhuk

The ways of OFDM-signal structural security increase are offered. Structural security estimation of OFDM-signal with additional spectrum spreading by quasiorthogonal pseudorandom sequences and by the method of pseudorandom operation frequency tuning is appraised.

Keywords: radio communications, broadband signal, structural stealth arsenal signals.