

УДК 621.391

К.С. Васюта, С.В. Озеров, О.А. Фещенко

<sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ПРИМЕНЕНИЕ МИМО-ТЕХНОЛОГИИ НА ХАОТИЧЕСКИХ НЕСУЩИХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ

*В работе рассмотрена возможность применения ММО-технологии на хаотических несущих для повышения скрытности функционирования военной системы радиосвязи. Описана математическая модель ММО-радиоканала. Выполнен корреляционный анализ сформированных хаотических, на предмет схожести с шумом наблюдения. Проведена оценка структурной скрытности информационного хаотического сигнала с помощью метода нелинейного анализа наблюдений (BDS-статистика).*

**Ключевые слова:** ММО-технология, хаотическая несущая, скрытность, корреляционный анализ, BDS-статистика.

### Введение

Основным требованием, предъявляемым к современным системам военной радиосвязи (СВРС), является их повышенная помехозащищенность (в данном случае повышенная скрытность функционирования), которая характеризуется успешным противодействием системы деструктивному воздействию со стороны противника. Под основой современного деструктивного воздействия на системы радиосвязи [1] следует понимать применение средств радиоэлектронной борьбы и радиоэлектронного подавления.

Одним из подходов повышения скрытности функционирования СВРС является применение хаотических сигналов, которые по своим статистическим характеристикам подобны шуму наблюдения.

Однако, системы связи, использующие хаотические сигналы эталонных нелинейных динамических систем (поточковых и каскадных), генерирующих "низкоразмерный" хаос, характеризуются в действительности ограниченной скрытностью функционирования, так как хаотические сигналы однозначно классифицируются в псевдофазовом пространстве нелинейными методами анализа, где случайный и детерминированный характер процессов, представленных образами их аттракторов, становится очевидным. Нелинейное строение аттрактора хаотического сигнала при малом уровне шума в наблюдении легко обнаруживается и реконструируется, так как он достаточно просто структурирован и легко отличим от аттракторов случайных процессов с независимыми значениями [2].

**Анализ литературы** [3, 4] показывает, что одним из перспективных методов обнаружения хаотического процесса на фоне белого шума является BDS-статистика, учитывающая меру сложности (различия в структурах) аттракторов хаотического и

случайного процессов, т.е. способность хаотических сигналов к обеспечению скрытности в полной мере не оправдывает себя в полной мере.

Таким образом **целью работы** является разработка метода направленного на повышение структурной скрытности хаотической несущей (усложнение ее аттрактора).

### Изложение основного материала

В ходе исследований [5] была установлена следующая закономерность, – применение хаотических несущих в ММО-технологии позволяет сформировать информационный сигнал обладающей повышенной структурной скрытностью. И чем больше ММО-подканалов имеет система радиосвязи, тем большей скрытностью обладает информационный сигнал, циркулирующий в системе.

ММО (Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход) – это технология, используемая в беспроводных системах связи (WIFI, WI-MAX, сотовые сети связи), позволяющая значительно улучшить спектральную эффективность системы, максимальную скорость передачи данных и емкость сети. Главным способом достижения указанных выше преимуществ является передача данных от источника к получателю через несколько радио соединений, откуда данная технология и получила свое название.

В каналах связи таких систем действует комплекс помех и искажений. В первую очередь необходимо учитывать влияние многолучевости, причиной которой является наличие отражений на трассе распространения радиоволн. В диапазоне коротких волн действуют многократные отражения от неоднородностей ионосферы. В диапазонах метровых (дециметровых) волн сказываются отражения от зданий, неровностей рельефа (при организации связи на открытой

местности), отражения от стен и конструкций (при связи внутри зданий). На рис. 1 приведена MIMO-система передачи данных [MIMO], где в качестве несущего сигнала используется хаотический процесс с разными начальными условиями  $x_0$  для каждого подканала  $h$ , состоящая из  $M$  передающих и  $N$  приемных антенн. Матрица коэффициентов передачи канала [6] является основной характеристикой канала MIMO и описывается выражением

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2N_t} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3N_t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & h_{N_r 3} & \dots & h_{N_r N_t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

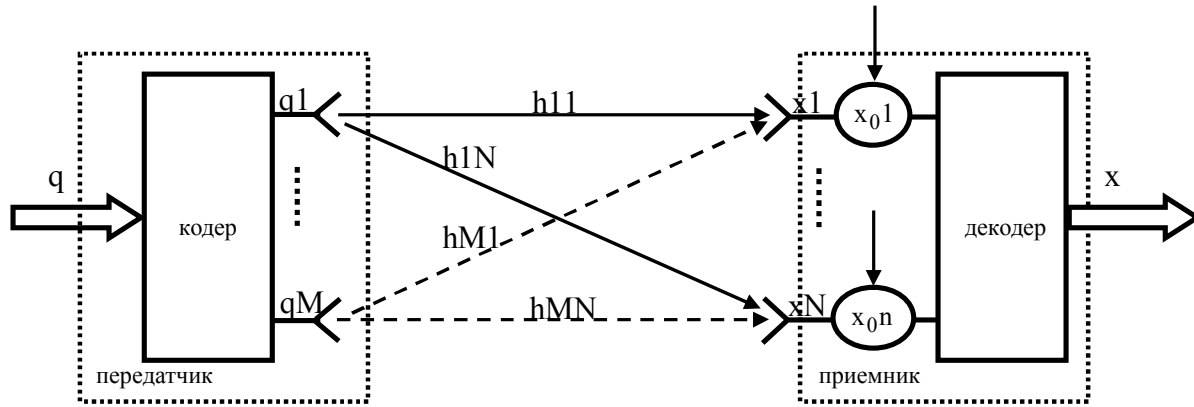


Рис. 1. MIMO-система связи с хаотической несущей

На передающей стороне сигнал  $q$  кодируется в пространственном кодере и разделяется на несколько потоков, каждый из которых передается в эфир по отдельному подканалу. На приемной стороне несколько антенн принимают сигнал из радиоэфира. Причем антенны на приемной стороне также устанавливаются с некоторым разнесением.

Принятые сигналы поступают на приемники, число которых соответствует числу антенн и трактов передачи. На каждый из приемников поступают сигналы от всех антенн системы. Каждый из таких приемников (сумматоров) выделяет из общего потока только энергию сигнала, настроенного на свое значение  $x_0$ .

Анализ литературы [6, 7] дает основание считать канал типа MIMO квазистационарным, в котором передающая и приемная стороны неподвижны и условия распространения радиоволн с течением времени остаются приблизительно постоянными или не меняются вообще, т.е. коэффициенты передачи  $h_{ij}$ , входящие в состав матрицы канала (1), неизменны на протяжении нескольких интервалов длительности сигналов. В то же время, эти коэффициенты изменяются случайным образом при изменении фиксированных положений передающих и приемных антенн.

Предполагается также, что статистика этих изменений подчиняется Рэлевокому либо обобщенному Рэлевокому распределению. Также необходимо отметить, что каждый коэффициент  $h_{ij}$ , входящий в состав матрицы канала (1), может состоять из нескольких лучей. Кроме того, коэффициенты передачи не являются независимыми. Это объясняется тем, что приемная антенная система имеет определенную конфигурацию.

Общей моделью радиоканала является многолучевая модель: поле в точке приема представляет собой сумму сигналов с разными амплитудами и случайными фазами. Основными моделями для описания многолучевого канала являются модели каналов со случайной структурой (канал с дискретной многолучевостью; канал с замираниями, селективными по частоте; канал с разнесенным приемом; канал со случайной фазой; канал с селективными замираниями). Модель многолучевого канала достаточно наглядно представлена в виде модели канала с дискретной многолучевостью в [7]. Принимаемый сигнал на входе  $l$ -го антенного элемента может быть представлен в виде:

$$z_r(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_t} [h_{c ln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + h_{s ln} u_x(t - (n-1)T - \tau_l) + \xi(t)], \quad (2)$$

где  $h_{c ln}$ ,  $h_{s ln}$  – соответствующие случайные синфазная и квадратурная составляющие коэффициента передачи в  $l$ -м луче с  $n$ -го передающего антенного элемента,  $L$  – общее число лучей в канале,  $\tau_l$  – время запаздывания сигнала в  $l$ -м луче,  $u_x$  – известные реализации сигналов на приеме,  $x = (0, 1, \dots, M-1)$  – последовательность информационных символов,  $M$  – число позиций манипуляции,  $T$  – длительность передаваемых элементов сигнала,  $\xi(t)$  – случайная аддитивная помеха типа белого шума.

Не теряя общности рассуждения, предположим, что длина трассы распространения сигнала, как правило, во много раз больше длины волны несущей радиосигнала. Это дает возможность не учитывать

конфигурацію передаючої антенної системи. То єсть можна вважати, що всі сигнали передаються з однієї точки простору. Крім того, з урахуванням лінійності моделі, а також конфігурації прийомної антенної решітки комплексний коефіцієнт передачі матриці  $H$  між  $r$ -ї прийомної і  $n$ -ї передаючої антеною можна представити в вигляді [6]:

$$h_{rn} = \sum_{l=1}^L (1 + \alpha A_{ul}) \exp(j\pi(r-1)(\varphi_{cl} + \beta\varphi_{\phi l})), \quad (3)$$

де  $\varphi_{cl} = \sin \pi(Q_1/180)$ ,  $Q_1$  – кут приходу сигналу  $l$  променя в градусах,  $A_{ul} = \sqrt{y_1^2 + y_2^2}$  – випадкова амплітуда сигналу  $l$  променя,  $\varphi_{\phi l} = \arctan(y_1/y_2)$  – випадкова фаза сигналу  $l$  променя,  $y_1$  і  $y_2$  – випадкові величини розподілені за Гауссовим законом,  $\alpha$  і  $\beta$  – вагові коефіцієнти, які дозволяють врахувати властивості просторової кореляції сигналів в елементах прийомної антенної решітки. Тоді сигнал на вході прийомної антенної решітки буде визначено виразом

$$\vec{z}(t) = N\vec{u}(t) + \vec{\xi}(t), \quad (4)$$

де  $\vec{u}(t)$  – вектор випромінюваних сигналів,  $\vec{\xi}(t)$  –  $N_r$ -мерний вектор шуму.

Дана модель дозволяє врахувати конфігурацію прийомної антенної решітки, багатопроменність і координати розташування перешкоди на шляху поширення сигналу в вигляді кутів приходу по основному і відбитим променям. Варіюючи коефіцієнтами  $\alpha$  і  $\beta$ , можна моделювати як повністю корелювані канали при  $\alpha = 0$  і  $\beta = 0$ , так і некорелювані.

В роботі [5] показано, що статистичні і динамічні характеристики сумарного інформаційного хаотичного сигналу (для MIMO 4x4) подібні аналогічним характеристикам шуму спостереження.

Для більш детальної оцінки хаотичних несучих з ускладненим аттрактором на предмет схожості з шумом спостереження використаємо елементи кореляційного аналізу процесів запропонованих в роботі [8]. Нижче наведено декілька основних розрахункових характеристик.

Середньоквадратичне значення бічних піків  $R_i$ , визначається через дисперсію

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=-(N-1)}^{N-1} R_i^2, \quad (5)$$

середнє значення модулів бічних піків

$$m_{|R|} = \frac{1}{2N} \sum_{i=-(N-1)}^{N-1} |R_i|, \quad (6)$$

середньоквадратичне значення модулів бічних піків, визначається через дисперсію

$$\sigma_{|R|}^2 = \sigma_R^2 - m_{|R|}^2, \quad (7)$$

а також значення максимального бічного піку  $R_{\max}$ .

Результати розрахунку, що характеризують перевищення  $\sigma_R$ ,  $m_{|R|}$ ,  $\sigma_{|R|}$ ,  $R_{\max}$  рівня  $\sqrt{N}$  (для  $N = 127$ ) наведено в табл. 1 в ненормованому вигляді. В таблиці також для порівняння наведено характеристики КФ білого шуму [8].

Таблиця 1

Характеристики КФ хаотических несучих і білого шуму

Корр. функції	$\sigma_R \sqrt{B}$	$m_{ R } \sqrt{B}$	$\sigma_{ R } \sqrt{B}$	$R_{\max} \sqrt{B}$
АКФ MIMO <sub>2x2</sub> хаотической несучей	0,78	0,62	0,48	2,09
ВКФ MIMO <sub>2x2</sub> хаотической несучей	0,65	0,51	0,4	1,99
КФ (АКФ, ВКФ) білого шуму	0,7	0,56	0,43	2,1 – 3,5

Аналіз таблиці показує, що характеристики АКФ і ВКФ наведених MIMO хаотических несучих схожі з статистичними характеристиками шуму спостереження.

Для оцінки структурної прихованості отриманого сигналу виведемо значення BDS-статистики для СВРС на хаотических несучих з використанням MIMO-технологій 2x2 і 4x4 і одноканальної системи відповідно до виразу [3]:

$$w_{m,N}(\epsilon) = \sqrt{N-m} \frac{C_{m,N}(\epsilon) - C_{1,N-m}(\epsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\epsilon)}, \quad (8)$$

де  $C_{m,N}(\epsilon)$  – кореляційний інтеграл,

$\sigma$  – дисперсія процесу,  $m$  – розмірність простору вложення (псевдофазового простору),  $N$  – кількість елементів часового ряду,  $\epsilon$  – радіус сфери покриття фазового простору.

На рис. 2 наведено графік, що характеризує залежність значень BDS-статистики сумарного інформаційного хаотического сигналу від відношення сигнал / шум на вході непараметрического виявителя.

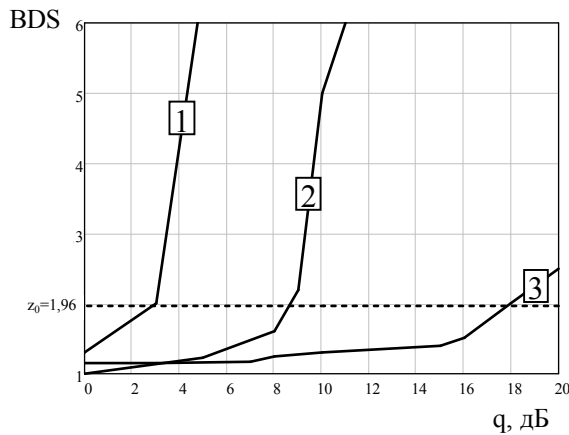


Рис. 2. Зависимость BDS-статистики для СВРС на хаотических несущих с применением MIMO-технологии (1 – одноканальная система, 2 – 2×2, 3 – 4×4)

Из анализа рисунка следует, что структурная скрытность суммарного информационного хаотического сигнала выше скрытности сигнала циркулирующего в одноканальной системе (на 6 и 15 дБ соответственно) и увеличивается пропорционально увеличению количества хаотических MIMO-подканалов.

### Выводы

Применение MIMO-технологии на хаотических несущих с различными начальными условиями формирования в системах радиосвязи, приводит к суперпозиции сигналов в линии связи. И как следствие к формированию суммарного информационного хаотического сигнала с усложненной структурой аттрактора, обладающего повышенной структурной скрытностью (большей на 6 и 15 дБ соответственно, чем у хаотического сигнала в одноканальной системе связи).

Идея применения MIMO-технологии и хаотических сигналов с различными начальными условиями формирования и теоретически может быть

реализована в системах военной радиосвязи с повышенной скрытностью функционирования.

### Список литературы

1. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
2. Костенко П.Ю. Повышение скрытности сигналов на основе усложнения аттрактора хаотического процесса с использованием линейного преобразования с ядром Мандельброта / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, С.Н. Симоненко // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53, № 12. – С. 14 – 23.
3. Барсуков А.Н. Методы повышения скрытности хаотических сигналов и их обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 / Барсуков Александр Николаевич. – К., 2010. – 148 с.
4. Новый подход к непараметрическому обнаружению хаотических сигналов на фоне белого шума с использованием "нелинейной динамической статистики" / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, А.Н. Барсуков и др. // Збірник наукових праць ХУПС. — X, 2010. — № 3 (25). — С. 108–116.
5. Васюта К.С. Метод повышения пропускной способности и скрытности системы радиосвязи путем применения MIMO-технологии на хаотических несущих / К.С. Васюта, С.В. Озеров, Ф.Ф. Зоц и др. // Системи управління, навігації і зв'язку. — К., 2012. — Вип. 3(23). — С. 223–227.
6. Коляденко Ю.Ю. Математическая модель радиоканала для MIMO-систем [Электронный ресурс] / Ю.Ю. Коляденко, А.В. Коляденко // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 2 (7). – С. 91 – 109. – Режим доступу до журн. [http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122\\_kolyadenko\\_mimo.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122_kolyadenko_mimo.pdf).
7. Флакман А.Г. Пространственное разделение пользователей в MIMO-системах, использующих параллельную передачу данных / А.Г. Флакман // Изв. вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. 45, № 11. – С. 986 – 997.
8. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

Поступила в редколлегию 6.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ЗАСТОСУВАННЯ MIMO-ТЕХНОЛОГІЇ НА ХАОТИЧНИХ НЕСУЧИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СКРИТНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІЙСЬКОВОЇ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

К.С. Васюта, С.В. Озеров, О.А. Фещенко

У роботі розглянуто можливість застосування MIMO-технології на хаотичних несучих для підвищення скритності функціонування військової системи радіозв'язку. Описано математичну модель MIMO-радіоканалу. Виконано кореляційний аналіз сформованих хаотичних несучих, на предмет подібності до шуму спостереження. Проведена оцінка структурної скритності інформаційного хаотичного сигналу за допомогою методу нелінійного аналізу спостережень (BDS-статистика).

**Ключові слова:** MIMO-технологія, хаотична несуча, скритність, кореляційний аналіз, BDS-статистика.

### USING THE MIMO-TECHNOLOGY ON CHAOTIC CARRIERS TO IMPROVE THE STEALTHY FUNCTIONING MILITARY RADIO SYSTEMS

K.S. Vasyuta, S.V. Ozerov, O.A. Feshenco

The paper considers the possibility of using MIMO-technology on chaotic carriers to improve the stealthy functioning of military radio system. The mathematical model of MIMO- radio channel is shown. Performed correlation analysis generated chaotic carriers, for similarity with noise observations. An assessment of structural secrecy of the information of the chaotic signal by the method of nonlinear analysis of observations (BDS-statistics).

**Keywords:** MIMO-technology chaotic carriers, stealth, correlation analysis, BDS-statistics.