

УДК 631.6 : 004.7

А.А. Можаяв<sup>1</sup>, М.А. Можаяв<sup>2</sup>, М.А. Логвиненко<sup>2</sup>, Наем Хазим Рахим<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*<sup>2</sup> *Харьковский научно-исследовательский институт судебных экспертиз, Харьков*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МІМО В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

*В статье исследуется использование компьютерных геоинформационных технологий для обеспечения экологического мониторинга. Анализируются типы сетей передачи информации, которые используются в управляющей вычислительной системе экологического контроля. Определено, что значительная часть используемых сетей является беспроводными сетями и предлагается их построение на базе технологий МІМО. Установлено, что рассмотренные алгоритмы обработки МІМО-сигналов позволяют повысить качество передачи информации в сложных условиях.*

**Ключевые слова:** система МІМО, система MC-CDMA, запись Эйлера.

### Введение

**Постановка задачи и анализ литературы.** В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. Для их решения необходим комплексный подход, который требует использования больших объемов экологической, картографической и другой количественной информации о состоянии компонент природной среды, что практически невозможно без применения развитых методов и средств информатики. Наиболее перспективными методами обработки и усвоения подобных объемов информации, на сегодняшний день, являются методы, основанные на использовании компьютерных геоинформационных технологий. Использование геоинформационных систем (ГИС), позволяющих проводить одновременный анализ многомерных данных с использованием цифровых карт, упрощает процедуры экологического прогноза и оценку комплексного воздействия на природную среду, делает возможным оперативное выявление аномалий и принятие необходимых мер для их устранения [1 – 10].

Задачи математического моделирования процессов, происходящих в окружающей среде, требуют визуализации расчетных данных. Современные информационные системы, в частности ГИС, позволяют эту визуализацию осуществить, причем обмен данными между моделями и ГИС может быть двусторонним. Начальные условия для модели, в частности, координаты объектов, могут быть получены из ГИС – систем. В свою очередь, ГИС – системы отображают результаты моделирования.

Система экологического контроля, реализующая задачи экологической и техногенной безопасности промышленного региона, должна базироваться на сетевой управляющей вычислительной системе (УВС), построенной с применением эффективных

программных и технических средств экологического мониторинга. Все результаты измерений в автоматическом режиме передаются в центр мониторинга и контроля промышленных выбросов региона. Управляющую вычислительную систему экологической и техногенной безопасности региона можно представить, как сетевой комплекс, объединяющий измерительные устройства и контроллеры пунктов мониторинга, рабочие станции центра мониторинга между собой, а также с уровнем управления регионом [5]. Рабочие станции занимаются обработкой и экологической информацией, ее архивированием.

Особенностью сетевой УВС экологического контроля является то, что значительная часть подсетей является беспроводной, что обусловлено особенностями месторасположения участков земной поверхности, подвергающихся мониторингу. Несмотря на то, что беспроводные сети используются достаточно долго, все же задача повышения качества обслуживания такими системами является **актуальной**.

**Целью данной статьи** является анализ использования МІМО-технологий для повышения качества передачи информации в сложных условиях

### 1. Системы МІМО

Средства беспроводной связи весьма широко используются в офисных и домашних сетях передачи информации, в интерфейсах "ноутбук настольный компьютер" и мультимедийных решениях. Все актуальнее становится дальнейшее повышение скорости передачи данных в таких приложениях. Большие надежды в решении этой задачи связаны с использованием так называемых МІМО-технологий (MultipleInput- MultipleOutput, множественный вход - множественный выход). И хотя существующие воплощения МІМО-идеи пока не всегда заметно ускоряют трафик на небольших расстояниях от точки доступа, уже доказано, что на больших удалени-

ях они весьма эффективны. MIMO-принцип позволяет уменьшить число ошибок при радиобмене данными (BER) без снижения скорости передачи в условиях множественных переотражений сигналов. При этом многоэлементные антенные устройства обеспечивают:

- расширение зоны покрытия радиосигналами и сглаживание в ней мертвых зон;
- использование нескольких путей распространения сигнала, что повышает вероятность работы по трассам, на которых меньше проблем с замираниями, переотражениями и т.п.;
- увеличение пропускной способности линий связи за счет формирования физически различных каналов (разделенных пространственно, с помощью ортогональных кодов, частот, поляризационных мод).

История систем MIMO как специфичного объекта беспроводной связи пока весьма не продолжительна. Первый патент на использование MIMO-принципа в радиосвязи был зарегистрирован в 1984 году сотрудником Bell Laboratories Джеком Винтерсом (Jack Winters) [5].

Базируясь на его исследованиях, Джек Селз (Jack Salz) из той же Bell Laboratories опубликовал в 1985 году первую статью по MIMO-решениям. Развитие данного направления продолжалось специалистами Bell Laboratories и другими исследователями вплоть до 1995 года. В 1996 году Грэг Ралей (Greg Raleigh) и Джеральд Дж. Фошини (Gerald J. Foschini) предложили новый подход к реализации MIMO-системы, увеличивший ее эффективность. Впоследствии Грэг Ралей, которому приписывают авторство в использовании OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - мультиплексирование посредством ортогональных несущих) для MIMO, основал компанию Airgo Networks, разработавшую первый MIMO-чипсет True MIMO.

Однако, несмотря на столь короткий век, MIMO-направление развивается весьма многопланово и включает в себя разнородное семейство методов, которые можно условно классифицировать в соответствии с принципом разделения сигналов в приемном устройстве. При этом в MIMO-системах используются как уже зарекомендовавшие себя подходы к разделению сигналов, так и новые. К ним относятся, в частности, пространственно-временное, пространственно-частотное, пространственно-поляризационное кодирование, а также сверхразрешение по направлению прихода сигнала в приемник. Именно обилие подходов к разделению сигналов обусловило столь долгую разработку стандартов на использование систем MIMO в средствах связи.

Простейшая антенна MIMO - это система из двух несимметричных вибраторов (монополей), ориентированных, например, под углом  $\pm 45^\circ$  относительно вертикальной оси (рис. 1).

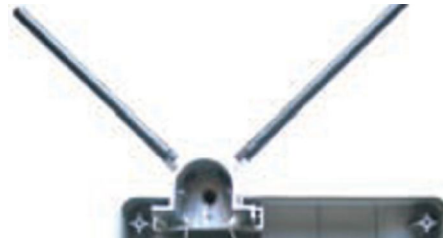


Рис. 1. Система MIMO с ортогональной поляризацией антенн

Такой угол поляризации ставит оба канала в равные условия, поскольку при горизонтально-вертикальной ориентации излучателей одна из поляризационных составляющих неизбежно получила бы большее затухание при распространении вдоль земной поверхности. Сигналы, излучаемые независимо каждым монополем, поляризованы взаимно ортогонально с достаточно высокой взаимной развязкой по кросс-поляризационной составляющей (не менее 20 дБ). Аналогичная антенна используется и на приемной стороне. Такой подход позволяет одновременно передавать сигналы с одинаковыми несущими, модулированными различным образом. Принцип поляризационного разделения обеспечивает удвоение пропускной способности линии радиосвязи по сравнению со случаем одиночного монополя (в идеальных условиях прямой видимости при идентичной ориентации приемных и передающих антенн). Таким образом, по сути любую систему с двойной поляризацией можно считать системой MIMO.

## 2. Ортогональное кодирование

CiscoSystems, и др. А фирма Airgo Networks уже приступила к серийному производству чипсета Другое направление реализации принципа MIMO - использование ортогонального кодирования (как правило, по фазе) сигналов, независимо излучаемых разными антенными элементами. Характерный пример - применение MIMO в устройствах стандарта IEEE 802.11. Об этом заявили многие производители оборудования, в частности, американская компания Vivato, тайваньская фирма D-Link (например, адаптер D-Link DWL-G650M Wireless MIMO Cardbus), компания Lynksys, вошедшая в корпорацию AGN300 для поддержки MIMO-опции в стандартах IEEE 802.11 a/b/g.

Один из возможных подходов к реализации ортогонального кодирования заключается в расширении спектра передаваемого сигнала методом прямой последовательности (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum). Суть DSSS состоит в замене каждого бита (или групп битов) исходного потока данных некоей псевдослучайной (шумоподобной) кодовой последовательностью. Основное требование к кодам, используемым при DSSS, - автокорреляция кодовой последовательности при сдвиге должна быть минимальной, в идеале равной 0. Тогда при многолучевом распростра-

нении (например, из-за переотражений в условиях городской застройки) сигнал, попавший на приемник с задержкой, будет восприниматься коррелятором как шум и не испортит основной (прямо распространяющийся) сигнал. На приемной стороне входной сигнал попадает на коррелятор, в котором происходит когерентное накопление (в простейшем случае это произведение входного сигнала на эталонную кодовую последовательность), в результате шумы отфильтровываются, и остается лишь полезный сигнал. Например, в стандарте IEEE 802.11 каждый бит, равный 1, заменяется 11-позиционным кодом Баркера (10110111000), а равный 0 - его инверсией. Один элемент такой кодовой последовательности называют чипом, а саму расширяющую последовательность базой сигнала.

При использовании техники MIMO в оборудовании стандарта IEEE 802.11 антенные излучатели передают сигналы либо с частотным разделением, либо со сдвигом по времени друг относительно друга, например на один чип. В последнем случае базы сигналов в каждом антенном канале оказываются взаимно ортогональными (или близкими к этому).

Дальнейшим развитием принципа DSSS в семействе стандартов IEEE 802.11 стало использование в протоколе 802.11b метода фазовой модуляции с помощью многофазной (полифазной) комплементарной кодовой последовательности (метод CCK - Complementary Code Keying). Первым изложил идею бинарных комплементарных кодов Марсель Голей (M.J.E. Golay), более полувека назад описав их принцип и методы генерации [5]. Суть комплементарного кодирования состоит в использовании двух последовательностей  $a$  и  $b$ , каждая из  $k$  элементов, с автокорреляционными функциями

$$A(i) = \sum_{j=1}^{k-i} a_j a_{j+i}; \quad B(i) = \sum_{j=1}^{k-i} b_j b_{j+i},$$

где  $i = 0, k-1$  - возможный сдвиг,  $A(i) + B(i) = 0$  при любом  $i \neq 0$ , и  $A(0) + B(0) = 2k$ .

Физическая интерпретация сдвига в данных формулах - прием прямо распространяющегося сигнала и сигнала с фазовой задержкой на  $i$  элементов (чипов). Иными словами, если система связи, использующая комплементарное кодирование, работает в условиях многопутевого распространения сигналов, то в идеале межсимвольная интерференция, вызванная наложением сигналов с задержками распространения, должна отсутствовать, так как сумма их автокорреляционных функций равна нулю.

Поскольку в стандарте IEEE 802.11 принята дифференциальная квадратурная фазовая модуляция (DQPSK), всего может быть четыре значения фазы, сдвинутые друг относительно друга на  $90^\circ$ . Суть применения CCK состоит в том, что поток транслируемых данных разбивается на группы по 8 бит каждая. Группа заменяется сигналом  $C$  из 8 чипов. Каждый чип - это сигнал, фаза которого определяется

квартетом  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  так, что

$$C = (c_1, \dots, c_8) = \left( e^{i(\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3+\Phi_4)}, e^{i(\Phi_1+\Phi_3+\Phi_4)}, e^{i(\Phi_1+\Phi_2+\Phi_4)}, -e^{i(\Phi_2+\Phi_4)}, e^{i(\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3)}, e^{i(\Phi_1+\Phi_3)}, -e^{i(\Phi_1+\Phi_2)}, e^{i(\Phi_2)} \right).$$

Применительно к квадратурной модуляции действительная и мнимая составляющие относятся к синфазному и квадратурному каналам соответственно/ В группе все 8 бит разбиваются на пары (дибиты), каждому дибиту ставится в соответствие определенный элемент фазового квартета  $\Phi_i$ . В зависимости от значений дибитов,  $\Phi_i$  оказывается равным 0, 90, 180 или  $270^\circ$ . Причем  $\Phi_1$  определяется фазой предыдущего символа и четностью текущего символа  $C$  в потоке, поэтому модуляция и называется дифференциальной. Можно показать, что при любых значениях дибитов последовательности  $C$  оказываются комплементарными.

На приемной стороне, при условии синхронного приема, декодирующее устройство восстанавливает значения  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ , а по ним - и значения информационных бит. Поскольку CCK-последовательности комплементарны, при применении техники MIMO возможна их одновременная трансляция. Например, четные чипы (или символы) передаются по одному антенному каналу, нечетные - по другому, при этом они оказываются практически ортогональными.

Развитием принципа DSSS стала технология мультиплексирования с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access). При этом на одной частоте излучаются сигналы с различными взаимно ортогональными базами (псевдослучайными кодовыми последовательностями). Причем для коррелятора, настроенного на определенную базовую последовательность, все другие сигналы выглядят как белый шум. Очевидно, что в этом случае при использовании технологии MIMO каждому антенному каналу ставится в соответствие определенный CDMA-код, и сигналы в них оказываются ортогональными.

Помимо кодового разделения каналов, все большее развитие получают системы с разделением на основе ортогональных частот (OFDM). Идея метода - вместо высокоскоростной модуляции одной несущей применять модуляцию набора поднесущих с гораздо меньшей скоростью. Весь диапазон разбивается на несколько ортогональных частот вида  $s_n(t) = A \cdot \sin(2\pi [f_0 + n\Delta f]t)$ , где  $n = 0, \dots, N$ ;  $\Delta f$  - интервал между поднесущими. Входной поток данных делится на группы (символы), которые используются для одновременной модуляции каждой поднесущей. К символам добавляют защитные интервалы (паузы) как эффективное средство борьбы с межсимвольной интерференцией. Чтобы метод был эффективен, число поднесущих должно быть достаточно большим от десятков до тысяч. Так, в стандарте IEEE 802.11 а и g используют 52 поднесущие,

в стандарті IEEE 802.16 - от 200 до 2048, в специфікації наземного цифрового телевізійного вшання DVB-T - 6817 поднесущих частот. Каждая из них модулюється посредством многоуровневой квадратурной модуляції. Выходной многочастотный сигнал синтезируют посредством обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ).

Очевидно, что системы OFDM по природе своей приспособлены для применения технологии MIMO, причем различными способами. Техника MIMO-OFDM предусмотрена стандартами IEEE 802.16, проектом IEEE 802.11n (рис. 2), рядом других перспективных разработок в области беспроводных сетей передачи информации.

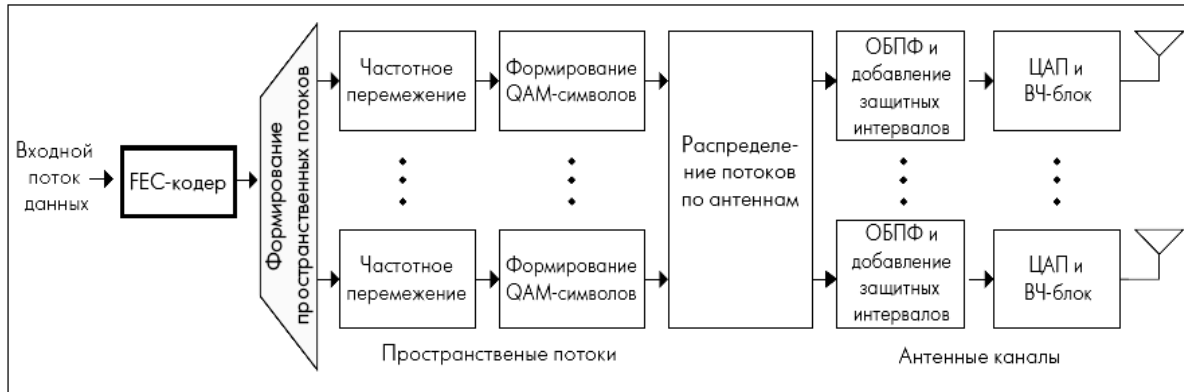


Рис. 2. Система передачи MIMO-OFDM

Следующим шагом развития техники CDMA и ее интеграции с OFDM стало частотно кодовое разделение каналов MC-CDMA (multicarrier CDMA - многочастотный CDMA).

Впервые эта технология была предложена в 1993 году профессором Калифорнийского университета в Беркли Линнарцем (Jean-Paul Linnartz) на традиционном Международном симпозиуме по персональным мобильным и внутри офисным коммуникациям (PIMRC – Personal Indoor and Mobile Radio Communications) в Йокогаме [6]. Изначально предлагалось передавать каждый бит исходного сообщения на нескольких ортогональных поднесущих. На каждой из частот бит должен заменяться CDMA-кодом длины N (рис. 3). В результате на всех поднесущих сигнал оказывается защищенным от межсимвольной и межканальной интерференции дважды частотным и кодовым разделением.

тов используется для формирования OFDM-символов, параллельно транслируемых каждым передатчиком (рис. 4). Такой подход позволяет при одних и тех же номиналах частот разделять каналы передачи MIMO-системы за счет дополнительной ортогональной кодовой модуляции. На приемной стороне из OFDM-сигнала сначала восстанавливаются ортогональные несущие (с помощью БПФ), а затем на каждой из них сигнал декодируется путем корреляционной обработки.

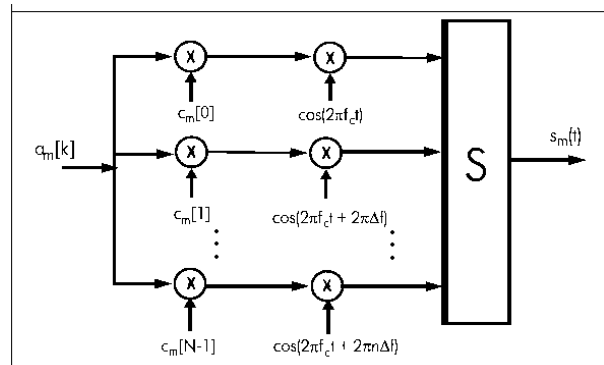


Рис. 3. Система MC-CDMA по Линнарцу [6]

По прошествии времени, в первую очередь в связи с поистине взрывным развитием OFDM-устройств (системы таких массовых стандартов, как IEEE 802.11 a/g, DVB, системы цифрового радиовещания и т.п.), стали появляться различные варианты реализации технологии MC-CDMA. Сегодня ее можно рассматривать как дальнейшее развитие кодированной OFDM-модуляции (COFDM), тем более что как синоним термина MC-CDMA зачастую используется понятие OFDM-CDMA.

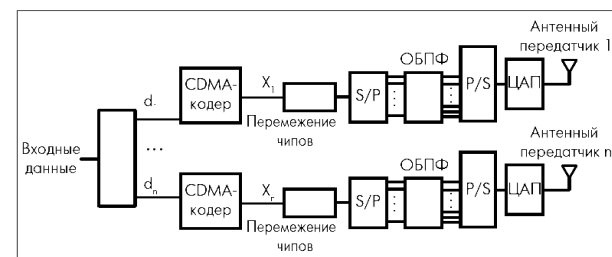


Рис. 4. Система OFDM-CDMA

В "классических" системах связи OFDM-CDMA используется один трансивер. В случае применения систем MIMO исходный поток данных разбивается на субпотoki по числу излучателей MIMO-передатчиков.

Для MIMO-систем возможен и другой вариант реализации MC-CDMA, когда сначала с помощью

В каждом субпотокe применяется свой CDMA код, и далее кодированная последовательность би-

ОБПФ синтезується потік OFDM-символів, а затем он подвергается дополнительному CDMA-кодированию. Причем исходный потік OFDM-символів розподіляється на субпотіки для кожного излучателя. Для кожного субпотіка використовується свій CDMA-код, кодера розполагаються перед входом ЦАП антенних излучателей.

При этом сигналы разных антенн имеют одни и те же частоты, а разделение при приеме происходит с помощью CDMA-кода: в приемнике на первом этапе производится корреляционная обработка с восстановлением пакетов гармонических сигналов с непрерывной фазой (свой синусоидальный пакет для каждого излучателя MIMO), а затем восстанавливаются сигналы на каждой ортогональной поднесущей OFDM с помощью БПФ. Оба рассмотренных варианта MC-CDMA по качеству передачи информации, в принципе, равноценны.

Таким образом, в статье приводится анализ алгоритмов обработки сигналов, которые используются в MIMO технологиях. Предлагаемые алгоритмы позволяют достичь значительного (до 15-20 %) увеличения пропускной способности сети передачи данных УВС экологического контроля, особенно для ситуации распространения информации в сложных условиях, за счет снижения ошибок передачи данных.

## Выводы

1. В статье исследуется использование компьютерных геоинформационных технологий для обеспечения экологического мониторинга. Анализируются типы сетей передачи информации, которые используются в управляющей вычислительной системе экологического контроля. Определено, что значительная часть используемых сетей является беспроводными сетями и предлагается их построение на базе технологий MIMO.

2. В результате исследований алгоритмов обработки сигналов, которые используются в MIMO технологиях, установлено, что рассмотренные алго-

ритмы обработки MIMO-сигналов позволяют повысить качество передачи информации в сложных условиях и тем самым значительно (до 15-20 %) увеличить пропускную способность линии связи за счет снижения ошибок передачи данных.

## Список литературы

1. Передача інформації у гетерогенних комп'ютерних мережах: монографія / О.О. Можасєв. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – 220 с.
2. Кучук Г.А. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Г.А. Кучук, А.А. Можасєв и др. – Х., 2006.
3. Кочура В.О. Моделирование динамических процессов у виртуальных з'єднаннях / В.О. Кочура, Г.А. Кучук, О.О. Можасєв // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х., 2006. – Вип. 2 (4). – С. 217-224.
4. History of MIMO in radio communications. - <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
5. Golay, M.J.E. Complementary series. - IRE Transactions, 1961, IT-7, p.82-87
6. N. Yee, J. P. Linnartz and G. Fettweis. Multi-Carrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks. - Proceedings PIMRC'93, Yokohama, Japan, 1993, p. 109-113.
7. Н. Al-Janabi // Восточно-Европейский журнал передовых технологий «Информационно-управляющие системы». – 2013. – Вып. 4/9 (64). – С. 35–38.
8. Кучук, Г.А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г.А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 2. – С. 97-102.
9. Можасєв О.О. Оцінка інформаційної ємності мобільних інформаційних мереж / О.О. Можасєв, І.І. Обод, І.Л. Яценко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 5 (121). – С. 136-138.
10. Можасєв М.О. Особливості моделювання передачі інформації у комп'ютерній мережі системи автоматичної ідентифікації суден./ В.Є. Кузьменко, М.О. Можасєв, В.В. Казімірова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 7 (123). – С.83-88.

Надійшла до редколегії 15.09.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.А. Кучук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ MIMO В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

О.О. Можасєв, М.О. Можасєв, М.О. Логвиненко, Наєм Хазім Рахім

У статті досліджується використання комп'ютерних геоінформаційних технологій для забезпечення екологічного моніторингу. Анализуються типи мереж передачі інформації, які використовуються в керуючій обчислювальній системі екологічного контролю. Визначено, що значна частина використовуваних мереж є бездротовими мережами і пропонується їх побудова на базі технологій MIMO. встановлено, що розглянуті алгоритми обробки MIMO-сигналів дозволяють підвищити якість передачі інформації в складних умовах.

**Ключові слова:** система MIMO, система MC-CDMA, запис Ейлера.

## MIMO USING TECHNOLOGY OF GIS ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM

O.O. Mozhaev, M.O. Mozhaiv, M.O. Lohvynenko, Naaem Hazim Raheem

The paper investigates the use of computer geoinformation technologies for environmental monitoring. Analyzed types of information networks, which are used in the system control computer environmental control. It was determined that a significant part of the network is used wireless networks and offers their construction technology based on MIMO. It found that MIMO-discussed signal processing algorithms are used to improve the quality of information transfer in difficult conditions.

**Keywords:** MIMO system, MC-CDMA system, the Euler recording.