

РЕАЛІЗАЦІЯ МІМО-СИСТЕМИ ДЛЯ ТСВА ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Кравчук С.О., Кравчук І.М.

*Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
E-mail: sakravchuk@ukr.net*

Implementation of the MIMO-system for HAPS by forming a virtual antenna array

A mathematical model of the virtual antenna system MIMO was developed by combining a constellation of interconnected stations on the basis of a high-altitude aeroplatform lying in the field of view of the terrestrial terminal. In this case, in the case of shaded Raysov fading, a function of probability density (PDF), cumulative distribution function (CDF), probability of interruption of communication and ergodic bandwidth of the system for the signal / noise ratio on the receiver of the user terminal are developed.

Одним із шляхів створення нових систем широкосмугового радіодоступу 5G із значним зростанням пропускної здатності є застосування багатоантенної просторово-часової обробки МІМО. Однак впровадження такої технології вимагає значного ускладнення обладнання. Тому використовують спрощені системні підходи її реалізації, зокрема підхід віртуальної антенної решітки (ВАР) [1-4].

Модель нашого сценарію будується за припущенням, що кожна приймально-передавальна станція на висотній аероплатформі (СВА) має одну антену і спроможна встановлювати користувацький зв'язок із наземним терміналом. Також СВА підтримують міжплатформенні радіолінії одна з одною. Існують лінії зв'язку базової магістральної мережі від СВА до наземних станцій або супутникових систем. За допомогою синхронної обробки на наземній станції, кожна СВА може отримати необхідний вибір часу і синхронізацію несучої. Тому множина СВА може передавати сигнали на приймач на одній частоті і в одному часовому інтервалі. У результаті множина одноантенних СВА формують ВАР. Множина із $N_{\text{сва}}$ СВА є еквівалентом розподіленої антенної системи із $N_{\text{сва}}$ антен. В залежності від наявної кількості антенних елементів на наземній користувацькій станції можна формувати режим віртуального MISO (multiple-input single-output) при одинарній антені або МІМО – при багатоантенній системі.

Якщо наземний термінал може встановлювати зв'язки з кількома СВА, то його функціонування визначається з урахуванням кількості активних антенних елементів СВА. При цьому можна забезпечити цілий ряд додаткових переваг з точки зору користувачів: поліпшення швидкості передачі даних та цілісності

інфраструктури, гнучкість маршрутизації сигналів, кооперативна ретрансляція та подолання нестабільності аероплатформи, що погіршує продуктивність системи тощо.

В даному сценарії маємо виграш від рознесення, який пояснюється наявністю множини антен (антенних елементів), які використовують некорельовані сигнали в кожній приймальній антені, і дозволяють зменшити амплітуду завмирань шляхом об'єднання сигналів, а потім досягти виграшу в продуктивності. Принцип цього полягає в тому, що коли на кожен канал впливає незалежне завмирання, СВА передає ряд копій одного й того ж сигналу по різних каналах, що може одночасно значно зменшити ймовірність глибокого затухання у всіх копіях. Таким чином, завмирання радіоканалу може бути зменшено і продуктивність передачі також поліпшено. Крім того, різні шляхи некогерентних сигналів по-різному обробляються приймачем, що може значно зменшити частоту бітових помилок (BER) інформації та ефективно протистояти блокуванню перешкод.

Прийmemo, що кількість СВА є $N_{сва} = N_H$, кількість приймальних антен на наземному терміналі - N_r , вектор передаваного сигналу - $s(t) \in C^{N_{сва} \times 1}$, який має енергетичне очікування $M[|s(t)|^2] = 1$. Вектор формування променю в МІМО-передавача може бути записаний у вигляді $w(N_{сва} \times 1)$. Сигнал передається через канал з матрицею комплексних коефіцієнтів передачі $H(t) = [h_{ij}(t)]_{N_r \times N_{сва}} \in C^{N_r \times N_{сва}}$, і приймається з використанням вектору формування променю v .

Отримана ймовірність переривання зв'язку в радіоканалах сценарію, що розглядається, наступна:

$$P_{out} = P_r(SNR \leq SNR_{th}) = F_\gamma(SNR_{th}) = \frac{\exp(-\text{tr}(\lambda)) |\Psi(\frac{\alpha \sigma^2}{2^2 SNR_{th}})|}{|V| (\Gamma(1 + N_{Hr} - N_{rH}))^{N_{rH}}}, \quad (1)$$

де $N_{rH} = \min \{N_{сва}, N_r\}$; $N_{Hr} = \max \{N_{сва}, N_r\}$; $\text{tr}(\dots)$ - оператор трасування; $\Psi(x)$ - матрична функція розмірністю $N_{rH} \times N_{rH}$ з елементами $\{\Psi(x)\}_{i,j} = \int_0^\infty z^{t-i} \exp(-z) {}_0F_1(1 + N_{Hr} - N_{rH}; \lambda_j z) dz$; $i, j = 1, 2, \dots, N_{rH}$; ${}_pF_q(\dots)$ - узагальнена гіпергеометрична функція з параметрами p і q ; $\Gamma(\dots)$ - неповна гамма-функція; α^2 і $2\sigma^2$ - відповідно потужності компонент LOS і NLOS; $\kappa = \alpha^2 / (2\sigma^2)$ - коефіцієнт Райсона; $H_{LOS}(f)$ - канална матриця затінених LOS-компонент; $H_{NLOS}(f)$ - канална матриця розсіяних та NLOS-компонент; $|V| = \prod_{i < j}^{N_{rH}} (\lambda_i - \lambda_j)$. Розкладання по власних значеннях крос-кореляційної матриці слід, по-перше виконати рішення векторів формування діаграми спрямованості w і v , щоб максимізувати SNR приймача. Його можна представити як

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{N_H}] \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_H}) [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{N_H}]^H, \quad (3)$$

де $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots$, $\lambda_N > 0$ - ненульові відмінні власні значення, а λ_1 і \mathbf{u}_1 - максимальне власне значення та відповідний вектор характеристики, відповідно. Оптимальний вектор формування променя може бути представлений: $\mathbf{w} = \mathbf{u}_1$ і $\mathbf{v} = \mathbf{H}\mathbf{u}_1 / \|\mathbf{H}\mathbf{u}_1\|_F$, де $\|\dots\|_F$ - оператор норми Фробениуса. Тоді максимальне значення SNR приймача має вигляд $\text{SNR} = \lambda_1 \text{SNR}_s$.

Ергодична пропускна здатність системи за нашим сценарієм буде:

$$\begin{aligned} C_e &= M \left[\Delta f \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P_i \lambda_i}{N_{\text{сва}} \sigma^2} \right) \right] = \\ &= M \left[\Delta f \log_2 \prod_{i=1}^r \left(1 + P_i \lambda_i / N_{\text{сва}} \sigma^2 \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

де Δf – ширина полоси частот підканалу.

Для моделювання запропонованого сценарію було застосовано середовище MATLAB R2014a. При цьому було прийнято: $N_{\text{сва}} = N_r = 1, 2, 4$; $\text{SNR} = \text{SNR}_{\text{th}} = 12$ дБ.

На рис. 1 наведено залежність ймовірності переривання зв'язку від середнього значення SNR при різній кількості СВА і антенних елементів наземного терміналу (пари цифр в скобках відповідають парі антен каналу MIMO).

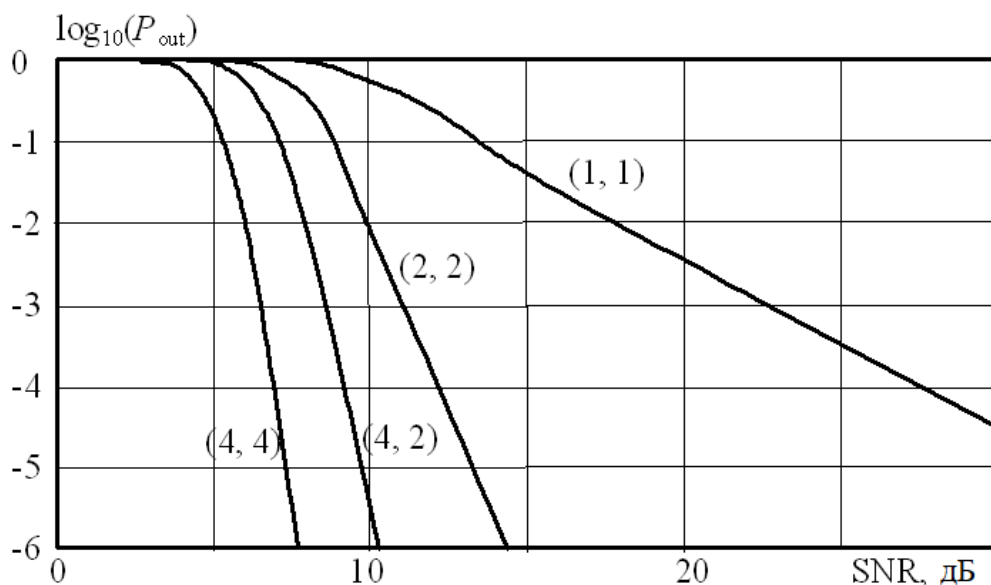


Рис. 1. Залежність ймовірності переривання зв'язку від середнього значення SNR при різній кількості СВА і антенних елементів наземного терміналу (пари цифр в скобках відповідають парі антен MIMO, $\text{SNR}_{\text{th}} = 12$ дБ)

Можна помітити, що продуктивність каналу MIMO (2, 4) краща, ніж (2, 2). Це відбувається тому, що хоча кількість СВА парна, кількість користувацьких

антен збільшена, щоб забезпечити більше підканалів (або шляхів рознесення) зв'язків між передавачем та приймачем. Конфігурація (2, 2) має 4 підканалів, а (2, 4) має 8 підканалів. Таким чином, конфігурація (2, 4) може забезпечити більш високий коефіцієнт виграшу рознесеного прийому. Крім того, з рис. 1 можна спостерігати, що продуктивність (4, 4) краща, ніж у (4, 2), а продуктивність (4, 2) краща, ніж у (2, 2), а продуктивність (1, 1) - найгірша. Отже, це вказує, що в однакових умовах кілька СВАО дійсно можуть забезпечити кращу продуктивність системи, ніж один СВАО.

Таким чином, розроблено математичну модель віртуальної антенної системи МІМО шляхом об'єднання сузір'я взаємопов'язаних станцій на базі висотної аероплатформи, що лежать в полі зору наземного терміналу. При цьому за умов затінених райсовських завмирань розроблено функцію щільності ймовірностей, кумулятивну функцію розподілу, ймовірності переривання зв'язку та ергодичну пропускну здатність системи для відношення сигнал/шум на приймачі користувачького терміналу. Доведено можливість покращення відношення сигнал/шум на приймачі користувача шляхом збільшення кількості СВАО в зоні видимості.

Результати проведеного моделювання підтвердили ефективність запропонованої конфігурації віртуальної антенної решітки для ТСВАО та її високої ефективності. Доведено, що віртуальна антенна решітка на базі ряду СВАО є перспективним рішенням для майбутніх високошвидкісних та частотно-ефективних інтелектуальних безпроводових мереж 5-го покоління.

Література

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017.
2. Кравчук С.А. Преимущества беспроводной архитектуры распределенной антенной системы над традиционной сотовой структурой // Зб. тез 3-ї міжнародної наук.-техн. конф. "Проблеми телекомунікацій", 21–24 квітня 2009 р., м. Київ, Україна. – К.: НТУУ "КПІ", 2009. – С. 48.
3. Kravchuk S.O. The mathematical model of the outage probability in MIMO-system with Rician fading and limited signal-to-noise relation // Modern information technologies in the sphere of security and defence. – 2015. - Nr 1 (22). – P. 63-67.
4. Кравчук С.О., Міночкін Д.А. Застосування багатоантенної технології МІМО в системах мобільного зв'язку специфікацій Long Term Evolution // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 1. – С. 85-99.