

Система автоматичного регулювання потужності передавача НВЧ для комбінованих мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станцій

Почерняев В. М.¹, Повхліб В. С.², Сивкова Н. М.¹

¹Одеська національна академія зв'язку імені О. С. Попова

²Державний заклад "Київський коледж зв'язку"

E-mail: povviktoriya@gmail.com

У статті досліджується адаптивна система автоматичного регулювання потужності передавача (АРПП). Система АРПП дозволяє компенсувати флуктуації сигналу, змінюючи потужність передавача так, щоб сигнал на прийомі залишався постійним. Використання АРПП актуально при роботі засобів зв'язку НВЧ діапазону по багатопроблемним каналам з замираннями, якими є тропосферні канали зв'язку. Розглянуто застосування системи АРПП для перспективних комбінованих мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станцій (МЦТрРРС). У роботі відзначено, що найбільш ефективною системою АРПП бореться з повільними, сезонними і «добового ходу» замираннями. Однак наявність системи АРПП в цифрових тропосферних станціях зв'язку дозволяє також боротися з швидкими замираннями, використовуючи короточасне збільшення потужності передавача. Це дозволяє істотно зменшити час падіння рівня сигналу нижче порогового і тим самим підвищити надійність зв'язку. У статті наводяться наближений розрахунок часу запізнювання сигналу на трасах тропосферних ліній зв'язку. В роботі досліджені труднощі реалізації системи АРПП і показана можлива структурна схема такої системи для МЦТрРРС. Відзначено, що реалізацію системи АРПП ускладнює створення потужного передавача НВЧ, в тому числі і твердотільного, здатного, з одного боку забезпечити чималі межі зміни потужності при високому ККД, а з іншого боку – витримувати пікові значення потужності, відповідні найбільш глибоким і тривалим замиранням сигналу. Найбільш проблематичним є встановлення порогового значення ймовірності помилки і порогового рівня сигналу або відношення сигнал/(шум+завада). Також відзначено, що вимога правильного вибору порогу регулювання є певною складністю реалізації системи АРПП. У статті введено показник енергетичного виграшу власне самої системи АРПП станції НВЧ діапазону і представлені таблиці розрахунків цього показника для закону Релея-Райса, закону Релея і логарифмічно-нормального закону. Наведено вирази для нормованої кореляційної функції, радіусу тимчасової кореляції тропосферного каналу зв'язку, інтеграла ймовірності і функції розподілу Релея-Райса. У статті здійснено перехід від функції двох змінних до функції однієї змінної та функція розподілу Релея-Райса представляється через функції Бесселя першого роду. У роботі показана залежність розподілу амплітуд по закону Релея-Райса від надійності зв'язку. Наприкінці роботи запропоновано визначення порогового значення і діапазону регулювання потужності системи АРПП, в тому числі і для МЦТрРРС.

Ключові слова: система автоматичного регулювання потужності передавача (АРПП); зворотний канал зв'язку; мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція; тропосферний канал зв'язку; багатопроблемне поширення радіохвиль; флуктуації сигналів; замирання сигналів; повільні замирання; ресурсна ефективність; функція розподілу Релея-Райса; щільності ймовірностей законів розподілу

DOI: [10.20535/RADAR.2021.84.40-47](https://doi.org/10.20535/RADAR.2021.84.40-47)

Вступ

Актуальність роботи. Система автоматичного регулювання потужності передавача (АРПП) є адаптивною системою. Така система дозволяє компенсувати флуктуації сигналу, змінюючи потужність передавача так, щоб в ідеалі сигнал на

прийомі залишався постійним. З точки зору ресурсної ефективності АРПП дозволяє істотно підвищити ККД передавача на лініях з багатопроблемним поширенням радіохвиль і замираннями, що означає економію споживаної електроенергії. Потужність передавача зменшується відповідно до зменшення загасання через повільні, сезонні і «до-

бового ходу» завмирання, щоб забезпечити незмінну якість зв'язку. Середньовипромінювана потужність на тропосферних лініях зв'язку може зменшуватися в 2...3 рази/період року, що дає суттєвий економічний ефект за рахунок економії споживаної електроенергії. Це пояснюється тим, що досить великий відсоток часу необхідна потужність передавача істотно нижче максимальної, яка визначається гіршими умовами поширення радіохвиль. На ряду з усуненням перевантаження вхідних каскадів приймача економія електроенергії за рахунок зниження потужності передавача є основним фактором, що визначає ефективність АРПП. Для реалізації виграшу в величині споживаної енергії доцільно передбачити в системі електроживлення станції зв'язку накопичувач енергії, реалізація якого не становить труднощів.

Система АРПП актуальна при роботі засобів зв'язку НВЧ діапазону по багатопроменевим каналах з завмираннями, якими є й тропосферні канали зв'язку. Будемо розглядати застосування системи АРПП для перспективних комбінованих мобільних цифрових тропосферних-радіорелейних станцій (МЦТрРРС) [1, 2].

Найбільш ефективна система АРПП, як було відзначено, бореться з повільними, сезонними завмираннями і завмираннями «добового ходу». Однак наявність системи АРПП в станціях зв'язку НВЧ діапазону таких як МЦТрРРС, дозволяє також боротися з швидкими завмираннями, використовуючи короточасне збільшення потужності передавача. Це дозволяє істотно зменшити час падіння рівня сигналу нижче порогового і тим самим підвищити надійність зв'язку.

Але при використанні АРПП для боротьби з швидкими завмираннями висуваються жорсткі вимоги до часу запізнювання сигналу. У загальному вигляді час запізнювання сигналу τ_3 можна представити в наступному вигляді:

$$\tau_3 = 2\tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{ап}}, \quad (1)$$

де $\tau_{\text{тр}} = 2R/c$ – запізнювання сигналу на трасі поширення радіохвиль, R – дальність зв'язку на інтервалі, $\tau_{\text{ап}}$ – запізнювання сигналу в апаратурі, яке визначається постійною часу НЧ ланцюгів пристрою управління й інерційними властивостями керуючого пристрою, датчиків, вимірювачів.

Для тропосферних ліній зв'язку з $R \approx 100...300$ км, величина τ_3 становить ~ 10 мс. За цей час параметри тракту поширення радіохвиль можуть вже змінитися. Час τ_3 також залежить від схемотехнічного рішення закладеного в АРПП ($\tau_{\text{ап}} > \tau_{\text{тр}}$).

Розрахунок часу запізнювання сигналу на трасі тропосферної лінії зв'язку (1) для більш довгохвильової ділянки діапазону НВЧ можна проводити за формулою:

$$\tau_{\text{тр}} \approx \frac{R}{c} \alpha \left(\gamma + \frac{\alpha}{2} \right),$$

де α – ширина головної пелюстки діаграми спрямованості, γ – кут закриття на тропосферній лінії зв'язку. Величину γ можна знайти з [3], рис. 1.3.

Постановка задачі дослідження

Аналіз літератури. Аналіз бібліографічних джерел показав, що найбільш близькими дослідженнями з автоматичного регулювання потужністю передавача є роботи [4–15].

В роботі [4] система АРПП розглядається як замкнута система автоматичного регулювання. Досліджена система має зворотний радіоканал, який організований для управління потужністю випромінювання передавача, і така система істотно компенсує вплив завмирань на прийом радіосигналів. Дана система [4] побудована на основі нечітких цифрових регуляторів і є нелінійною і нестационарною, тому синтез такої системи представляє досить складне завдання. Одна з можливих функціональних схем системи АРПП показана на рис. 10.1, с. 745 [4].

В роботі [5] показано, що в мережах безпроводового зв'язку система АРПП здатна підтримувати не тільки певний рівень сигнал/шум, але й якість зв'язку за параметром ймовірності помилкового прийому. В роботі [6] оцінюється розподілена мережа з точки зору мінімізації загального енергоспоживання шляхом використання системи АРПП. У роботах [8, 11, 12] показано, що за допомогою системи АРПП можна вирішувати завдання енергоефективності або спектральної ефективності. В роботі [9] запропоновано використання алгоритму адаптивної оцінки каналу для управління потужністю передавача. У роботах [10, 13] показано застосування регулювання потужності передавача в системах багатостанційного доступу. В роботі [15] проведено оцінку залежності вихідної потужності передавача від позасмугових характеристик випромінювання та їх впливу на дальність зв'язку.

Труднощі реалізації та проблемні питання. Потужність передавача НВЧ вибирається виходячи з забезпечення заданої надійності та ймовірності помилки в «гіршому» через метеоумови місяця року і необхідної дальності зв'язку для заданої швидкості передачі. Різниця в медіанних рівнях сигналу «гіршого» і «кращого» через метеоумови місяців року становить 10...15 дБ, а протягом доби медіанний рівень сигналу може змінюватися в межах 4 дБ взимку, і в межах 10 дБ влітку. Тому межа регулювання потужності передавача пристрою повинна становити не менше 20...25 дБ виходячи з виразу:

$$D = P_{\text{прд}}^{\text{max}} - P_{\text{прд}}^{\text{nom}},$$

де $P_{\text{прд}}^{\text{max}}$ – максимально передана потужність, $P_{\text{прд}}^{\text{nom}}$ – номінальна передана потужність. Регулювання потужності повинно здійснюватися за значеннями рівня сигналу кореспондента за командами,

що передані на передавальну сторону по зворотному каналу зв'язку.

На приймальній стороні здійснюється вимірювання відношення сигнал/(шум+завада) і ймовірності

помилки. Можлива схема системи АРПП для комбінованої МЦТрРРС показана на рис. 1.

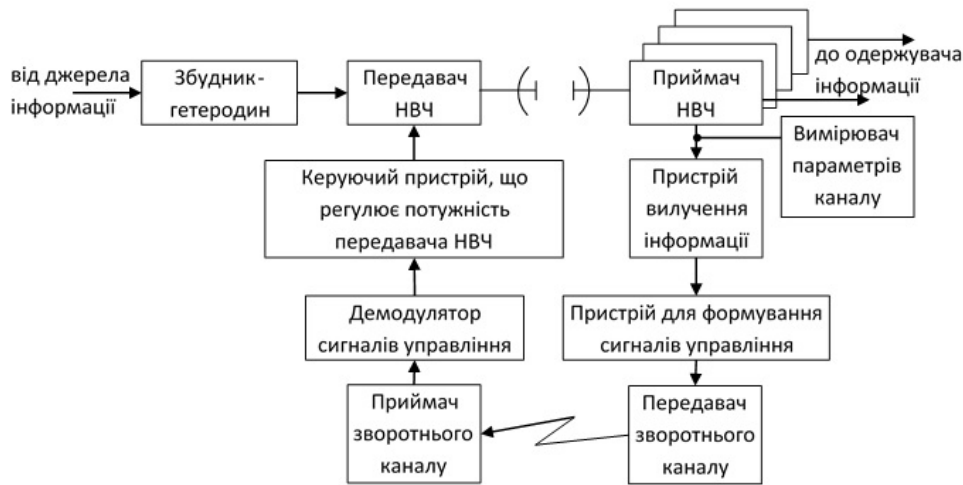


Рис. 1. Схема системи АРПП

Вилучені з каналу дані обробляються і приймається рішення про зміну потужності передавача НВЧ. При зменшенні (збільшенні) достовірності прийнятої інформації і співвідношення сигнал/(шум+завада) нижче (вище) порогового значення сигналу на збільшення (зменшення) потужності передавача кореспондента, які приймаються приймачем зворотного каналу і надходять через демодулятор сигналів управління на керуючий пристрій для зміни потужності передавача НВЧ. При збільшенні співвідношення сигнал/(шум+завада) і зниженні достовірності прийнятої інформації можна зробити висновок про присутність завади і тоді виробляється сигнал про збільшення потужності передавача НВЧ. Робота МЦТрРРС з мінімальною необхідною потужністю випромінювання не тільки підвищує розвідзахищеність станції, але і дозволяє мати енергетичний запас, який можна використовувати для боротьби з будь-якого роду завадами шляхом збільшення потужності сигналу кореспондента. Як зворотній канал можна використовувати обладнання каналу телеуправління-телесигналізації і в цьому випадку основна складність буде в розробці керуючого пристрою, який регулює потужність передавача НВЧ.

Можливо найбільш проблематичним є встановлення порогового значення ймовірності помилки і порогового рівня сигналу або відношення сигнал/(шум+завада). Це пояснюється тим, що при побудові тропосферної лінії зв'язку різної протяжності (різну кількість інтервалів) необхідно змінювати значення перерахованих вище параметрів на інтервалах для досягнення заданої надійності зв'язку по всій тропосферній лінії зв'язку. Наступною складністю є вимога правильного вибору по-

рогу регулювання системи АРПП. Однією з рекомендацій може бути вибір порогу регулювання по відношенню до медіанного значення рівня сигналу на одноінтервальної тропосферній лінії зв'язку в «найгірший» через метеоумови місяць року. В інші місяці року медіанний рівень сигналу зростає. Поріг регулювання можна також встановлювати по стандартному відхиленню повільних завмирань сигналу. В будь-якому випадку система АРПП повинна при перевищенні середнього за швидкими завмираннями значення сигналу на вході приймача НВЧ підтримувати сигнал на постійному рівні на виході передавача НВЧ станції кореспондента.

Мета роботи. Визначення показника енергетичного виграшу системи АРПП та знаходження розподілу флуктуації двох випадкових величин на основі функції розподілу Релея-Райса, що дозволяє визначити діапазон регулювання потужності системи АРПП комбінованих МЦТрРРС.

Ресурсна ефективність

Реалізація системи АРПП в МЦТрРРС сприяє зниженню енергетичних витрат і, отже, підвищує ресурсну ефективність засобів зв'язку НВЧ діапазону. Однак реалізація системи АРПП ускладнює створення потужного передавача НВЧ, в тому числі і твердотільного, який здатний, з одного боку забезпечити чималі межі зміни потужності при високому ККД, а з іншого боку – витримує пікові значення потужності, відповідні найбільш глибоким і тривалим завмиранням сигналу. Необхідно також передбачити вимоги до системи електроживлення передавача НВЧ, яка повинна забезпечити короточасне значне

зростання потужності НВЧ. У схемі електроживлення необхідно передбачити накопичувач енергії для реалізації виграшу в споживанні електроенергії.

Ефективність власне самої системи АРПП станції НВЧ діапазону, в тому числі і МЦТрРРС можна оцінити за показником енергетичного виграшу η :

$$\eta = \frac{P_{\text{мед}}}{P_{\text{АРПП}}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{мед}}$ – медіанна потужність передавача НВЧ, $P_{\text{АРПП}}$ – усереднена потужність, яка надходить в тропосферну лінію зв'язку від станції НВЧ діапазону з АРПП.

В системі АРПП МЦТрРРС регулювання потужності здійснюється дискретно з кроком 1 дБ. Усереднене значення потужності передавача НВЧ станції з АРПП $P_{\text{АРПП}}$ з формули (2) можна приблизно оцінити в такий спосіб:

$$P_{\text{АРПП}} = \sum_{i=1}^L P_i \rho(\sigma),$$

де P_i – потужність передавача НВЧ в i -му положенні дискретного регулятора системи АРПП, $\rho(\sigma)$ – ймовірність використання i -ого положення дискретного регулятора, L – число положень дискретного регулятора з кроком 1 дБ, залежне від діапазону регулювання системи АРПП, σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини від медіанного значення. Величина $\rho(\sigma)$ буде визначатися ймовірністю помилкового прийому (заданою якістю зв'язку). Наближення полягає в тому, що ймовірність помилки залежить тільки від потужності передавача НВЧ, що забезпечує необхідний рівень сигналу на вході приймача НВЧ. Надійність зв'язку, в свою чергу від ймовірності помилки. Залежно від умов поширення сигналу на тропосферній лінії зв'язку використовуються закони розподілу ймовірностей Релея-Райса, Релея, логарифмічно-нормальний. Вирази для щільності ймовірностей цих законів наступні [16]:

Релея-Райса –

$$\frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2a^2}\right) I_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right); \quad (3)$$

Релея –

$$\frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right); \quad (4)$$

логарифмічно-нормальний –

$$\frac{\lg \exp\left(-\frac{(\lg x - m)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi x \sigma}}. \quad (5)$$

Розрахунки показника енергетичного виграшу η наведені в табл. 1 для закону Релея-Райса, в табл. 2 – для закону Релея, в табл. 3 – для логарифмічно-нормального закону.

Табл. 1 Показники енергетичного виграшу від надійності зв'язку для закону Релея-Райса (3)

η , дБ	6, 5	7	8, 5	9	9, 5
H , %	95	96	97	98	99

Табл. 2 Показники енергетичного виграшу від надійності зв'язку для закону Релея (4)

η , дБ	6	6, 5	7, 5	7, 9	8, 1
H , %	95	96	97	98	99

Табл. 3 Показники енергетичного виграшу від надійності зв'язку для логарифмічно-нормального закону (5)

η , дБ	6, 6	7, 3	8, 8	9, 3	9, 9
H , %	95	96	97	98	99

Розподіл флуктуації двох випадкових величин на основі функції розподілу Релея-Райса

Як відомо, тропосферний канал зв'язку є багатопроменевим каналом із завмираннями. При багатопроменевому поширенні радіохвиль може бути присутнім і «регулярний» промінь. Модель такого каналу описується законом розподілу Релея-Райса. При відсутності «регулярного» променя можна використовувати закон розподілу Релея. Такий підхід був застосований в роботі [16] при передачі аналогових сигналів в тропосферних каналах зв'язку. Істотною відмінністю даної роботи є те, що застосовано розподіл Релея-Райса при передачі цифрових сигналів в тропосферних каналах зв'язку, включаючи канали, що утворені комбінованими МЦТрРРС.

На підставі результатів роботи [17] отримаємо вираз для нормованої кореляційної функції R_τ в наступному вигляді:

$$R_\tau = \exp\left[\frac{m^2}{2\sigma^2} - \left(\frac{\tau_3}{\rho_\tau}\right)^2\right], \quad (6)$$

де m – математичне очікування регулярної складової сигналу, σ^2 – дисперсія складових сигналів, τ_3 – час запізнювання сигналу на лінії, включаючи зворотний канал зв'язку, ρ_τ – радіус тимчасової кореляції. Радіус тимчасової кореляції тропосферного каналу зв'язку ρ_τ для формули (6) визначимо наступним чином:

$$\rho_\tau = \frac{r_{\text{екв}} c}{2\pi f R v},$$

де $r_{\text{екв}}$ – еквівалентний радіус Землі, c – швидкість світла, f – робоча частота, R – дальність зв'язку, $v = \sqrt{v_b + v_r}$ – середньоквадратичне значення швидкостей переміщення неоднорідностей,

v_v, v_r – вертикальна і горизонтальна складові швидкості переміщення неоднорідностей відповідно. Для розрахунків можна використовувати: $v_v \approx 5$ м/с, $v_r \geq 50$ м/с.

Огинаючи сигналу передавача НВЧ можна виразити таким чином:

$$x(t) = \frac{V}{\xi(t)},$$

де V – постійний рівень сигналу на виході передавача НВЧ, що відповідає заданій якості зв'язку (ймовірність помилки при необхідній надійності зв'язку), $\xi(t)$ – випадкова величина замирання сигналу за законом Релея-Райса. Якщо загальне запізнювання сигналу в каналі зв'язку $\tau_3 \approx 10$ мс, то сигнал на приймальній стороні буде флюктувати. Знайдемо розподіл цих флюктуацій. Нормований сигнал на вході приймача НВЧ з урахуванням часу τ_3 можна записати в такий спосіб:

$$u = \frac{\xi(t)}{\xi(t - \tau_3)}.$$

Значення ймовірності двовимірної випадкової величини виражається інтегралом [18]:

$$\rho(u^2) = \iint_{u^2 \leq \zeta^2 + \chi^2} f(\zeta, \chi) d\zeta d\chi. \quad (7)$$

Вираз (7) є розподілом відносини двох корельованих випадкових величин. Щільність ймовірності $f(\zeta, \chi)$ записується таким чином [19]:

$$f(\zeta, \chi) = \frac{1}{2\pi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [(\zeta - q)^2 + (\chi - s)^2] \right\},$$

де (q, s) – центр розподілу ймовірностей.

Вираз для інтеграла ймовірності:

$$\Phi(u, v) = \frac{1}{2\pi} \iint_{u^2 \leq \zeta^2 + \chi^2} \exp^{-\frac{1}{2}[(\zeta - v)^2 + \chi^2]} d\zeta d\chi,$$

де величина $v = \sqrt{q^2 + s^2}$ виконує функцію параметра розподілу.

Функція $[1 - \Phi(u, v)]$ є функція розподілу Релея-Райса. Ця функція при $v = 0$ переходить в добре відому функцію розподілу Релея. Функції розподілу Релея-Райса табульовані [19].

Фізична суть нормованого значення сигналу u на вході приймача НВЧ і деякого необхідного значення сигналу v математично визначається тим, що ймовірність (1) залежить від радіуса u і відстані v від початку координат до центру розподілу ймовірностей (q, s) . Тому, ймовірність (1) можна записати у вигляді інтеграла $\Phi(u, v)$.

Розкладемо функцію $\Phi(u, v)$ в ряд по циліндричним функціям:

$$\Phi(u, v) = 1 - \exp \left(-\frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{u}{v} \right)^n I_n(u, v),$$

де $I_n(u, v)$ – модифікована функція Бесселя порядку n від двох змінних. На підставі [20] представимо:

$$I_n(u, v) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{uv}{2} \right)^{n+2k}}{k!(n+k)!}.$$

При $n = 0$ маємо:

$$\Phi(u, v) + \Phi(v, u) = 1 + \exp \left(-\frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right) I_0(u, v).$$

Якщо $u = v$, то отримаємо:

$$\Phi(u, u) = \frac{1}{2} [1 + \exp(-u^2) I_0(u, u)]. \quad (8)$$

Формула (8) має практичне значення, незважаючи на те, що отримана наближеним способом. Дана формула показує фізичну суть способу АРПП при досягненні нормованого рівня сигналу на вході приймача НВЧ до необхідного рівня.

Здійсимо перехід від функції двох змінних до функції однієї змінної. Циліндричну функцію від двох змінних можна розкласти в ряд Неймана [21]:

$$I_n(u, v) = \sum_{\rho=0}^{\infty} (-1)^\rho \left(\frac{u}{v} \right)^{n+2\rho} J_{n+2\rho}(u),$$

де $J_{n+2\rho}(u)$ – функція Бесселя першого роду порядку $n + 2\rho$.

В роботі [21] наводиться таке співвідношення, яке використовується нами при обчисленнях:

$$I_n(u, v) + I_{n+2}(u, v) = \left(\frac{u}{v} \right)^n J_n(u).$$

На рис. 2 показана залежність розподілу амплітуд по закону Релея-Райса від надійності зв'язку: пунктирна крива відповідає діапазону 20 дБ, а суцільна крива – діапазону 30 дБ. При побудові кривих враховувався час запізнювання $\tau_3 \approx 10$ мс, радіус тимчасової кореляції $\rho_\tau \approx 200$ мс.

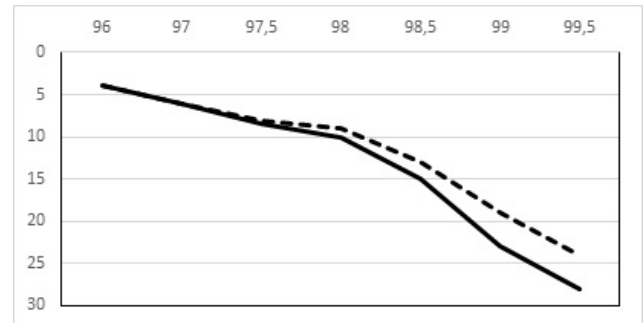


Рис. 2. Залежність розподілу амплітуд по закону Релея-Райса

Граничне значення можна визначити, як мінімальну потужність сигналу необхідну для досягнення необхідної дальності зв'язку із заданою пропускнуною спроможністю при необхідному відношенні сигнал/шум:

$$P_{\text{гр}} = \left(\frac{\text{сигнал}}{\text{шум} + \text{завада}} \right) N_{\text{ш}} k T \mathcal{R}, \quad (9)$$

де $N_{\text{ш}}kT$ – спектральна щільність потужності шуму, \mathcal{R} – швидкість передачі інформації. Спільне рішення рівняння (9) з розподілом флуктуацій двох випадкових величин на основі функцій розподілу Релея-Райса дозволяє визначити порогове значення і діапазон регулювання потужності системи АРПП (рис. 2). В цілому відзначимо, що математична теорія побудови системи АРПП заснована на положеннях роботи [22].

Висновки

Значний інтерес представляє використання системи АРПП для боротьби з повільними завмираннями і економною витратою електроенергії (ресурсна ефективність). При зменшенні загасання на тропосферній лінії зв'язку через повільні завмирання і сезонний «хід» рівня сигналу потужність передавача НВЧ відповідно зменшується так, щоб забезпечити незмінну якість зв'язку. Середньорічна випромінювана потужність на тропосферній лінії зв'язку в залежності від кількості і протяжності інтервалів може зменшуватися приблизно в 1,5...2,5 рази, що дає суттєвий економічний ефект. При цьому зменшується ймовірність появи внутрішньосистемних перешкод від сусідніх станцій, що особливо актуально для мереж комбінованих МЦТрРРС.

У роботі досліджена функція розподілу Релея-Райса. При цьому здійснено перехід від функції двох змінних до функції однієї змінної та функція розподілу Релея-Райса виражена через функції Бесселя першого роду. У роботі показана залежність розподілу амплітуд по закону Релея-Райса від надійності зв'язку. Запропоновано визначення порогового значення і діапазону регулювання потужності системи АРПП, яка може використовуватися в комбінованій МЦТрРРС.

Перелік посилань

1. Патент 112217 Україна. С2. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Заявник і патентовласник Почерняєв В. М., Повхліб В. С.; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016 // Бюл. № 15.
2. Патент 120288 Україна. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція / Почерняєв В. М., Повхліб В. С., Зайченко В. В.; заявл. 29.08.2017; опубл. 11.11.2019 // Бюл. № 21.
3. Наритник Т. М. Цифрові тропосферні та радіорелейні лінії: основи розрахунку / Т. М. Наритник, В. М. Почерняєв, В. С. Повхліб // Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2019. – с. 169.
4. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В. И. Гостев // К.: «Радиоаматор». – 2008. – с. 972.
5. Payasi Y., Shrivastava A., Jain A. Negotiation based adaptive distributed power control algorithm in wireless communication system // *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4) (10-12 Sept. 2015)*. – Indore, India, 2015. – PP. 1-5. DOI: 10.1109/IC4.2015.7375575.
6. Bistriz I. and Bambos N. The Power of Consensus: Optimal Distributed Multichannel Wireless Transmitter Power Control // *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC) (20-24 May 2019)*. – Shanghai, China, 2019. – PP. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761391.
7. Pal A. Transmit Power Reduction \neq Proportional Power Savings: Applicability of Transmit Power Control in Large-Scale Wireless Sensor Networks // *IEEE Internet of Things Magazine*. – 2020. – Vol. 3, No. 1. – PP. 20-24. DOI: 10.1109/IOTM.0001.1900067.
8. Lee W., Kim M. and Cho D. Deep Power Control: Transmit Power Control Scheme Based on Convolutional Neural Network // *IEEE Communications Letters*. – 2018. – Vol. 22, No. 6. – PP. 1276-1279. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2825444.
9. Yang C. Channel Estimation for Inverse Power Control in Wireless Communication Networks // *2015 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IHM-MSP) (23-25 Sept. 2015)*. – Adelaide, SA, Australia, 2015. – PP. 138-141. DOI: 10.1109/IHM-MSP.2015.26.
10. Singh K. Optimal Power Control in Decentralized Gaussian Multiple Access Channels // *IEEE Communications Letters*. – 2018. – Vol. 22, No. 9. – PP. 1938-1941. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2856240.
11. Shi J., Tao L., Chen M. and Yang Z. Power control for relay-assisted device-to-device communication underlying cellular networks // *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP) (15-17 Oct. 2015)*. – Nanjing, China, (2015). – PP. 1-6. DOI: 10.1109/WCSP.2015.7341217.
12. Feng C., Zhong Y., Quek T. Q. S. and Wu G. Power control in full duplex networks: Area spectrum efficiency and energy efficiency // *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) (21-25 May 2017)*. – Paris, (2017). – PP. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7997482.
13. Sharma M. K., Murthy C. R. and Vaze R. Asymptotically Optimal Uncoordinated Power Control Policies for Energy Harvesting Multiple Access Channels With Decoding Costs // *IEEE Transactions on Communications*. – 2019. – Vol. 67, No. 3. – PP. 2420-2435. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2879926.
14. Rasti M., Hasan M., Le L. B. and Hossain E. Distributed Uplink Power Control for Multi-Cell Cognitive Radio Networks // *IEEE Transactions on Communications*. – 2015. – Vol. 63, No. 3. – PP. 628-642. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2397885.
15. Eliardsson P., Wiklundh K., Axell E., Stenumgaard P. Mitigation of co-channel interference by transmit power control // *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC) (16-22 Aug. 2015)*. – Dresden, Germany, 2015. – PP. 189-193. DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256156.
16. Немировский А. С. Борьба с замираниями при передаче аналоговых сигналов / А. С. Немировский // М.: Радио и связь. – 1984. – с. 208.
17. Гусятинский И. А. Дальняя тропосферная радиосвязь / И. А. Гусятинский, А. С. Немировский, А. В. Соколов, В. Н. Троицкий // М.: Связь. – 1968. – с. 248.

18. Стратонович Р. Л. Избранные вопросы теории флуктуации в радиотехнике / Р. Л. Стратонович // М.: Сов. радио. – 1961. – с. 558.
19. Барк Л. С. Таблицы распределения Релея-Райса / Л. Н. Большев, П. И. Кузнецов, А. П. Черенков // М.: ВЦ АН СССР. – 1964. – с.248.
20. Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций: ч. 1. / Г. Н. Ватсон // М.: ИИЛ. – 1949. – с. 797.
21. Грей Э. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике / Э. Грей, Г. Б. Мэтьюз // М.: ИИЛ. – 1953. – с. 372.
22. Стратонович Р. Л. Принципы адаптивного приема / Р. Л. Стратонович // М.: Сов. радио. – 1973. – с. 144.
- [11] Shi J., Tao L., Chen M. and Yang Z. (2015). Power control for relay-assisted device-to-device communication underlying cellular networks. *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, China, pp. 1-6, DOI: 10.1109/WCSP.2015.7341217.
- [12] Feng C., Zhong Y., Quek T. Q. S. and Wu G. (2017). Power control in full duplex networks: Area spectrum efficiency and energy efficiency. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7997482.
- [13] Sharma M. K., Murthy C. R. and Vaze R. (2019). Asymptotically Optimal Uncoordinated Power Control Policies for Energy Harvesting Multiple Access Channels With Decoding Costs. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 67, No. 3, pp. 2420-2435. DOI: 10.1109/TCOMM.2018.2879926.

References

- [1] Pochernyaev V. M., Povkhlil V. S. C2. Mobile digital tropospheric radio relay station. *Patent 112217 Ukraine*, application 12.09.2014, published on 08.10.2016. Bulletin №15.
- [2] Pochernyaev V. M., Povkhlil V. S., Zaichenko V. V. Mobile digital tropospheric radio relay station. *Patent 120288 Ukraine*, application 29.08.2017, published on 11.11.2019. Bulletin №21.
- [3] Narytnyk T. M., Pochernyaev V. M., Povkhlil V. S. (2019). Digital tropospheric and radio relay lines: basics of calculation. *Odessa: ONAT O.S.Popova*, p.169. [In Ukrainian].
- [4] Gostev V.I. (2008). Fuzzy controllers in automatic control systems. *K: "Radioamator"*, p.972. [In Russian].
- [5] Payasi Y., Shrivastava A., Jain A. (2015). Negotiation based adaptive distributed power control algorithm in wireless communication system. *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*, Indore, India, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IC4.2015.7375575.
- [6] Bistriz I. and Bambos N. (2019). The Power of Consensus: Optimal Distributed Multichannel Wireless Transmitter Power Control. *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761391.
- [7] Pal A. (2020). Transmit Power Reduction \neq Proportional Power Savings: Applicability of Transmit Power Control in Large-Scale Wireless Sensor Networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, Vol. 3, No. 1, pp. 20-24. DOI: 10.1109/IOTM.0001.1900067.
- [8] Lee W., Kim M. and Cho D. (2018). Deep Power Control: Transmit Power Control Scheme Based on Convolutional Neural Network. *IEEE Communications Letters*, Vol. 22, No. 6, pp. 1276-1279. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2825444.
- [9] Yang C. (2015). Channel Estimation for Inverse Power Control in Wireless Communication Networks. *2015 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IHH-MSP)*, Adelaide, SA, Australia, pp. 138-141. DOI: 10.1109/IHH-MSP.2015.26.
- [10] Singh K. (2018). Optimal Power Control in Decentralized Gaussian Multiple Access Channels. *IEEE Communications Letters*, Vol. 22, No. 9, pp. 1938-1941. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2856240.
- [14] Rasti M., Hasan M., Le L. B. and Hossain E. (2015). Distributed Uplink Power Control for Multi-Cell Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 63, No. 3, pp. 628-642. DOI: 10.1109/TCOMM.2015.2397885.
- [15] Eliardsson P., Wiklundh K., Axell E., Stenumgaard P. (2015). Mitigation of co-channel interference by transmit power control. *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, Germany, pp. 189-193. DOI: 10.1109/ISEMC.2015.7256156.
- [16] Nemirovsky A. S. (1984). Coping with fading in analog signal transmission. *M.: Radio and communication*, p.208. [In Russian].
- [17] Gusyatinsky I. A. (1968). Distant tropospheric radio communication. *M.: Communication*, p. 248. [In Russian].
- [18] Stratonovich R. L. (1961). Selected questions of the theory of fluctuations in radio engineering. *M.: Soviet radio*, p. 558. [In Russian].
- [19] Bark L. S. Bolshev L. N., Kuznetsov P. I., Cherenkov A. P. (1964). Rayleigh-Rice distribution tables. *M.: ВЦ АН СССР* p. 248. [In Russian].
- [20] Watson G. N. (1949). The theory of Bessel functions: part 1. *M.: IIL*, p. 797. [In Russian].
- [21] Gray E., Matthews G.B. (1953). Bessel Functions and Their Applications to Physics and Mechanics. *M.: IIL*, p. 372. [In Russian].
- [22] Stratonovich R. L. (1973). Principles of adaptive reception. *M.: Soviet radio*, p. 144. [In Russian].

Система автоматической регулировки мощности передатчика СВЧ для комбинированных мобильных цифровых тропосферно-радиорелейных станций

Почерняев В. Н., Повхлиб В. С., Сивкова Н. М.

В статье исследуется адаптивная система автоматической регулировки мощности передатчика (АРМП). Система АРМП позволяет компенсировать флуктуации сигнала, изменяя мощность передатчика так, чтобы сигнал на приеме оставался постоянным. Использование АРМП актуально при работе средств связи СВЧ-диапазона по многолучевым каналам с замираниями, какими являются тропосферные каналы связи. Рассмотрено применение системы АРМП для перспективных комбинированных мобильных цифровых тропосферно-радиорелейных станций (МЦТрРРС). В работе отмечено, что наиболее эффективно система АРМП борется с медленными, сезонными и «суточным ходом» замираний. Однако наличие системы АРМП в цифровых тропосферных станциях связи позволяет также бороться с быстрыми замираниями, используя кратковременное увеличение мощности передатчика. Это позволяет существенно уменьшить время падения уровня сигнала ниже порогового и тем самым повысить надежность связи. В статье приводится приближенный расчет времени запаздывания сигнала на трассах тропосферных линий связи. В работе исследованы трудности реализации системы АРМП и показана возможная структурная схема такой системы для МЦТрРРС. Отмечено, что реализацию системы АРМП затрудняет создание мощного передатчика НВЧ, в том числе и твердотельного, способного, с одной стороны обеспечить достаточно большие пределы изменения мощности при высоком КПД, а с другой стороны – выдерживающего пиковые значения мощности, соответствующие наиболее глубоким и продолжительным замираниям сигнала. Наиболее проблематичным является установление порогового значения вероятности ошибки и порогового уровня принимаемого сигнала или отношения сигнал/(шум+помеха). Также отмечено, что требование правильного выбора порога регулирования является определенной сложностью реализации системы АРМП. В статье введен показатель энергетического выигрыша собственно самой системы АРМП станции СВЧ диапазона и представлены таблицы расчета этого показателя для закона Релея-Райса, закона Релея и логарифмически-нормального закона. Приведены выражения для нормированной корреляционной функции, радиуса временной корреляции тропосферного канала связи, интеграла вероятности и функции распределения Релея-Райса. В статье осуществлен переход от функции двух переменных к функции одной переменной и функция распределения Релея-Райса выражается через функции Бесселя первого рода. В работе показана зависимость распределения амплитуд по закону Релея-Райса от надежности связи. В заключении работы предложено определение порогового значения и диапазона регулировки мощности системы АРМП, в том числе и для МЦТрРРС.

Ключевые слова: система автоматической регулировки мощности передатчика; обратный канал связи; мобильная цифровая тропосферно-радиорелейная станция; тропосферный канал связи; многолучевое распространение радиоволн; флуктуации сигналов; замирания сигналов; медленные замирания; ресурсная эффективность; функция распределения Релея-Райса; плотности вероятностей законов распределения

Automatic Transmitter Power Control System for Combined Mobile Digital Troposcatter-Radiorelay Stations

Pochernyaev V. M., Povkhlil V. S., Sykova N. M.

The article examines the automatic microwave transmitter power control system (ATPCS). The ATPCS makes it possible to compensate for signal fluctuations by changing the transmitter power so that the signal at reception remains constant. The use of ATPCS is relevant for the microwave communication operations over multipath channels with fading, which include troposcatter communication channels. The application of the ATPCS system for perspective combined mobile digital troposcatter-radiorelay stations (MDTRRS) is considered. It is noted in the article that the ATPCS is most effective in combat slow fading, season fading and “diurnal variation”. However, the presence of the ATPCS in digital troposcatter communication stations also makes it possible to combat fast fading by using a short-term increase the transmitter power. This makes it possible to significantly reduce the time of the signal level falls below the threshold level and thereby to increase the reliability of communication. An approximate calculation of the signal delay time on the paths of troposcatter communication lines is presented in the article. The difficulties of implementing the ATPCS are investigated and a possible structural diagram of such system for MDTRRS is shown. It is noted that the implementation of the ATPCS makes it difficult to create a powerful microwave transmitter, including a solid-state transmitter. The most problematic is the setting of a threshold value for the probability of error and the threshold level of the received signal or signal-to-noise ratio. It is noted that the requirement for the correct choice of the regulation threshold level is a certain complexity of the implementation of the ATPCS. In the article an indicator of the energy gain of the ATPCS of a microwave station itself is introduced and tables of this indicator calculating for the Rayleigh-Rice law, Rayleigh's law and the logarithmic-normal law are presented. Expressions for the normalized correlation function, the radius of the temporal correlation of the troposcatter communication channel, the probability integral and the Rayleigh-Rice distribution function are presented. The transition from a function of two variables to a function of one variable is carried out and the Rayleigh-Rice distribution function is expressed in terms of the Bessel functions of the first kind. The dependence of the distribution of amplitudes according to the Rayleigh-Rice law on the reliability of communication is shown. In conclusion, it is proposed to determine the threshold value and the range of power adjustment of the ATPCS, including the MDTRRS.

Key words: automatic transmitter power control system; reverse communication channel; mobile digital troposcatter-radiorelay station; troposcatter communication channel; multipath propagation of radio waves; signal fluctuations; signal fading; slow fading; resource efficiency; Rayleigh-Rice distribution function; densities of probability laws distribution