

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

На правах рукопису

Ельченко Сергій Володимирович

УДК 321.396.49

**МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ
СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ**

Спеціальність: 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків-2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Коляденко Юлія Юріївна,

Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри телекомунікаційних систем

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Горобець Микола Миколайович,

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, завідувач
кафедри прикладної електродинаміки;

кандидат технічних наук

Сокол Галина Вікторівна,

Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут", Військовий інститут телекомунікацій та
інформатизації,
викладач відділення підготовки фахівців за контрактом

Захист відбудеться "31" жовтня 2012 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.052.09 при Харківському національному університеті радіоелектроніки
за адресою: 61166, м.Харків, пр.Леніна 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету
радіоелектроніки за адресою: 61166 м.Харків, пр.Леніна. 14.

Автореферат розісланий "28" вересня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Дуравкін Є.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТИ

Актуальність теми. У супутникових системах зв'язку (ССЗ) використовуються ретранслятори зв'язку (РЗ) на різних орбітах. Найбільш популярними є: геостаціонарна орбіта (GEO), середні орбіти (MEO) і низькі орбіти (LEO). ССЗ є унікальними, зокрема в тому, що РЗ, перебуваючи в далекому космосі, не підлягає ремонту і весь ресурс, закладений на Землі, не може бути поповнений. Тому задача забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) в ССЗ набуває особливої значущості. На сьогоднішній день основна частка трафіку припадає на GEO, оскільки вони досить добре відпрацьовані технологічно. Супутники на геостаціонарних орбітах використовуються в основному для систем радіо і телебачення (ТБ), де затримки в 250 мс (в кожному напрямку) не позначаються на якісних характеристиках сигналів.

В останні роки, як в Україні, так і за кордоном все більша увага приділяється цифровому ТБ. Основні вимоги до передачі сигналів ТБ зводяться до забезпечення їх мінімальних спотворень. Від якості телевізійного зображення безпосередньо залежить достовірність сприйняття інформації, що подається глядачеві. Сигнали цифрового ТБ можуть належати різним стандартам і форматам зображення - від звичайного до зображень високої чіткості. Крім того, варто додати можливість паралельної передачі додаткової інформації.

В даний час розроблені, експериментально досліджені і введені в експлуатацію наступні системи цифрового ТБ: європейська DVB, американська ATSC і японська ISDB.

DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite) - стандарт супутникового цифрового ТБ розроблений консорціумом DVB і стандартизований Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів. Стандарт охоплює всі рівні моделі взаємодії відкритих систем OSI з різним ступенем деталізації способу передачі цифрового сигналу. На більш високих рівнях моделі OSI стандартизується система умовного доступу, спосіб організації інформації для передачі в середовищі IP, різні метадані та ін.

В даний час вимоги до якості каналів супутникового зв'язку постійно зростають, як і потреба в цих каналах. Не малу роль в цьому процесі відіграє поступовий перехід операторів супутникового ТБ до стандарту DVB-S2, який дозволяє транслювати телевізійні канали високої чіткості. Разом з тим, зростає потреба в більш високих швидкостях передачі даних, отже, і в збільшенні смуги частот транспондерів, що знаходяться на борту штучного супутника Землі.

В сучасних системах зв'язку, потреба передачі інформації по каналам з обмеженою смугою пропускання стимулювала пошук методів ефективної експлуатації спектральних і просторових ресурсів. Такі системи можуть бути реалізовані при повторному використанні частот з ортогонально поляризованими несучими. Два незалежних потоки послідовностей, передані одночасно на вертикальній і горизонтальній поляризації, на одній частоті

приймаються двома відповідними по поляризації антенами. На практиці при виконанні такої схеми в системах супутникового цифрового ТБ відзначаються тенденції погіршення якості сигналу внаслідок появи крос-поляризації.

Тому, одним з обмежень у досягненні високих швидкостей передачі даних є наявність взаємного впливу каналів зв'язку, тобто наявність порушень внутрішньосистемної ЕМС. Однією зі складових цього впливу виступають крос-поляризаційні спотворення. Таким чином, рішення задач внутрішньосистемної ЕМС, розробка методів підвищення завадостійкості супутникових систем зв'язку є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційні дослідження пов'язані з положеннями "Концепції національної інформаційної політики", "Концепції національної програми інформатизації", "Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки" та "Концепції конвергенції телефонних мереж та мереж з пакетною комутацією в Україні". Дисертаційна робота є продовженням і подальшим розвитком наступних науково-дослідних робіт (НДР): НДР № 213-1 "Методика дослідження аналізу електромагнітної сумісності в мобільних системах зв'язку" (ДР № 0107U001568) яка виконувалася в Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ); НДР "Концепція обробки, аналізу і передачі даних в ІАС НАКУ" ("Моніторинг-С"), яка виконувалася в Харківському державному регіональному науково-технічному центрі з питань технічного захисту інформації. Результати дисертаційної роботи використано в НДР № 261 "Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління".

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення завадостійкості передачі цифрової інформації по радіолініям зв'язку та забезпечення внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку стандартів DVB-S і DVB-S2. Для досягнення цієї мети сформульовані і вирішені такі задачі:

- аналіз завадостійкості супутникових систем зв'язку стандартів DVB-S і DVB-S2;
- проведення натурних досліджень крос-поляризаційної структури сигналу в супутникових лініях зв'язку;
- розробка методу аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку стандартів DVB-S і DVB-S2;
- проведення аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку стандартів DVB-S і DVB-S2;
- розробка методу адаптивної компенсації крос-поляризаційних завад для супутникових систем зв'язку;
- проведення аналізу ефективності адаптивного компенсатора крос-поляризаційних завад в супутникових системах зв'язку.

Об'єкт дослідження. Процеси поширення сигналів у супутникових радіолініях зв'язку та зміни їх поляризаційної структури.

Предмет дослідження. Моделі електромагнітних взаємодій радіоелектронних засобів та методи забезпечення умов електромагнітної сумісності та завадостійкості супутникових систем зв'язку з використанням поляризаційно-часових методів обробки сигналів.

Методи досліджень базуються на основних положеннях радіофізики, теорії електрозв'язку, системного аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії оптимізації, теорії оцінювання та управління, методах поляризаційно-часової обробки сигналів, математичного моделювання, імітаційного та натурального експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено метод врахування поляризаційних втрат в супутникових лініях зв'язку, відмінною особливістю якого є урахування поляризаційних характеристик ортогональних реальних антенних каналів на суміжних частотах. Метод засновано на проведених натурних експериментальних дослідженнях крос-поляризаційної структури сигналу в супутникових лініях зв'язку супутника Hot Bird 8.

2. Удосконалено метод аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку, який враховує втрати потужності сигналу і крос-поляризаційної завади, що відбуваються через вплив неузгодженості по поляризації і ступеня поляризації прийнятих електромагнітних хвиль.

3. Вперше для підвищення завадостійкості та забезпечення внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку розроблено метод адаптивної компенсації крос поляризаційних завад із суміжних каналів. Для організації основного і ортогонального каналу розроблена структура антени з керованою поляризацією.

Практичне значення отриманих результатів

1. Практичне застосування методу обліку поляризаційних втрат в супутникових лініях зв'язку дозволить підвищити якість зв'язку в системі супутникового цифрового телебачення.

2. Метод аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності дозволить при проектуванні або функціонуванні супутникової системи зв'язку проводити вибір кращих з точки зору електромагнітної сумісності каналів. Практичне застосування методу аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності підвищить якість зв'язку в системі супутникового цифрового телебачення.

3. Практичне використання адаптивного компенсатора крос-поляризаційних завад із суміжних каналів дасть вигрaш по завадостійкості 20 дБ і більше.

Результати дисертаційних досліджень реалізовані в:

- Харківському національному університеті радіоелектроніки при розробці методу аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку (акт реалізації від 12.02.2012);

- навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки при вивченні дисципліни «Теорія електричного зв'язку» (акт реалізації від 03.03.2012).

Особистий внесок здобувача у спільних публікаціях. В роботі [4] автору належить проведення аналізу ефективності адаптивного компенсатора крос-поляризаційних завад. В роботі [5] автору належить розробка методики аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися на наукових семінарах кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ, а також на 3-х Міжнародних конференціях [6-8]. Всі виступи за темою дисертації.

Публікації. За темою дисертації представлено 5 статей, які опубліковані в фахових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який складається з 66 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг роботи 144 сторінки з них: 56 рисунків, 24 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми досліджень, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, наведені інші необхідні характеристики дисертаційної роботи.

У першому розділі проведено аналіз стану сучасних супутникових систем зв'язку. Показано, що для супутникових систем зв'язку стандартів DVB-S і DVB-S2 характерні обмежена потужність переданого сигналу і, отже, підвищена чутливість до впливу шумів і інтерференційних завад. Для підвищення завадостійкості в цих системах застосовується спільне використання енергетично ефективною квадратурної фазової модуляції QPSK і каскадного кодування каналу на базі укороченого коду RS і згортального коду в поєднанні з алгоритмом декодування Вітербі. При цьому теоретично гарантується ймовірність помилок близько 10^{-10} ... 10^{-11} . Однак, на практиці досягти такої ймовірності помилок не завжди вдається. Одним з обмежень в досягненні такої ймовірності помилок є наявність взаємного впливу каналів зв'язку, тобто наявність порушень внутрішньосистемної електромагнітної сумісності. Однією зі складових цього впливу виступають крос-поляризаційні завади.

В якості частотного плану розглянуті транспондери супутника Hot Bird 8 Ku діапазону. Даний супутник має на борту 64 транспондера. Загальна смуга частот транспондерів супутника становить 1753 МГц. Смуга пропускання кожного транспондера на рівні 3 дБ складає від 26 до 54 МГц в залежності від конструкції транспондера. Рознос частот між несучими частотами транспондерів становить 19 МГц, що не дає запасу для виконання умов електромагнітної сумісності. Електромагнітна сумісність забезпечується за рахунок рознесення суміжних каналів по поляризації - вертикальну і

горизонтальну. На практиці ж при виконанні такої схеми за рахунок впливу різних атмосферних явищ, гідрометеорів, іоносфери і т.п. відзначаються тенденції погіршення якості сигналу і як наслідок - поява крос-поляризації. Таким чином, для забезпечення електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку необхідно: проведення дослідження крос-поляризаційної структури сигналу в супутникових лініях зв'язку та удосконалення методу обліку поляризаційних втрат в супутникових лініях зв'язку; розробка методу аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку, що враховує крос-поляризаційну структуру сигналу; розробка методу компенсації крос-поляризаційних завад в системі супутникового зв'язку.

У другому розділі проведені натурні дослідження крос-поляризаційної структури сигналу в супутникових лініях зв'язку та вдосконалено метод обліку поляризаційних втрат в супутникових лініях зв'язку.

Проведено натурні експериментальні дослідження крос-поляризаційної структури сигналу при впливі гідрометеорів у вигляді дощу. Експеримент проводився при прийомі сигналу з транспондера 65 супутника Hot Bird 8. За результатами вимірювань побудовані залежності потужності сигналу P_c від інтенсивності випадання опадів J (рис.1) і відношення сигнал/шум h^2 від інтенсивності випадання опадів J (рис.2).

Рис. 1. Залежність потужності
' дБмВт сигналу від інтенсивності
випадання опадів

'
мм/год

Рис. 2. Залежність відношення
' дБ сигнал / шум від інтенсивності
випадання опадів

'
мм/год

Аналіз показав, що при впливі гідрометеорів у вигляді дощу інтенсивністю від 0 до 30,0 мм/год потужність сигналу змінювалась від 59 до 47,5 дБмВт, при цьому відношення сигнал/шум змінювалося в межах від 12,4 до 3,5 дБ, а рівень крос-поляризаційної вибірковості змінювався в межах від 30,9 до 10,5 дБ. Також дослідним шляхом було встановлено, що мінімальне значення відношення сигнал/шум, для задовільної роботи системи, становить 5,1 дБ (вірно для стандарту DVB-S). Мінімальне значення, при якому проводилася синхронізація і визначалися параметри MPEG - 2 Transport Stream складає 2 дБ.

Рис. 3. Взаємозв'язок між рівнем крос-поляризаційної вибіркості і відношенням сигнал / шум

, дБ

Отримано взаємозв'язок між рівнем крос-поляризаційної вибіркості і відношенням сигнал/шум в прямому каналі. На рис. 3 представлена дана залежність. З даного графіка видно, що зі збільшенням відношення сигнал/шум в прямому каналі збільшується і крос-поляризаційна вибіркості. Крім того, спостерігається лінійна залежність між цими параметрами.

Проведено тестування моделей крос-поляризаційної вибіркості і загасання сигналу CPA внаслідок дощу. Тестування моделей UTI-R, FUK і DHW було проведено при використанні параметрів супутників Olympus і Hot Bird 8. Вимірювання з супутника Hot Bird 8 були виконані автором в Харкові (Україна). Вимірювання з супутника Olympus були виконані в Ейндховені (Нідерланди). На рис.4 представлено взаємозв'язок між крос-поляризаційною вибіркостію і загасанням сигналу внаслідок дощу, для моделей UTI-R, DHW, FUK і вимірювань в Харкові, Ейндховене. З графіка видно, що функції мають відмінності зумовлені похибкою моделей і вимірювального обладнання.

В процесі аналізу результатів вимірювань виявлений кореляційний зв'язок між крос-поляризаційною вибіркостію і загасанням. Дослідження показали, що найбільш близька модель ITU-R до вимірювань зробленим в Ейндховені

(середньоквадратичне значення похибки становить 2,498 дБ). А модель FUK найбільш близька до вимірювань, зробленим в Харкові (середньоквадратична похибка становить 2,496 дБ). Крім того, Дана модель перевірена вимірами, виконаними в Японії в рамках ETS-II і SSE експериментів (лінійна і кругова поляризація). Таким чином, в роботі модель FUK рекомендується для подальших досліджень.

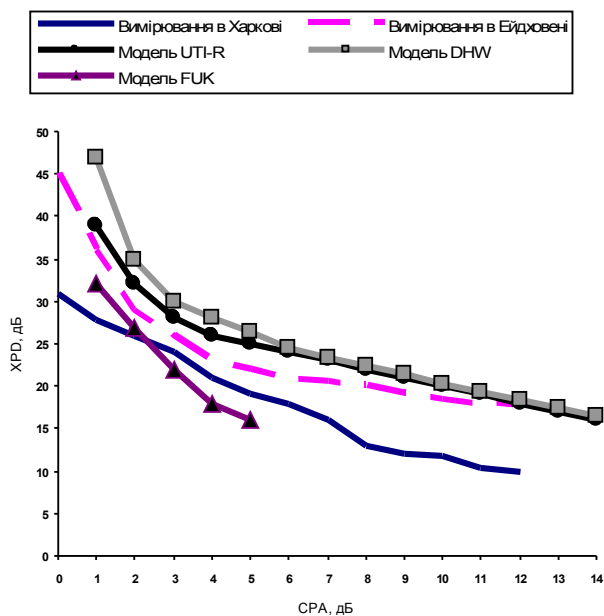


Рис.4. Графічне зображення вимірювань в Харкові, Ейндховені і моделей UTI-R, DHW, FUK

У третьому розділі розроблено метод аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку. В якості показника ЕМС обрано відношення сигнал/завада+шум (ВСЗШ).

Потужність сигналу на вході приймача визначається рівнянням передачі

$$P_{np} = P_{nep} + L_{тр} + W, \quad (1)$$

де P_{nep} - еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність;

$L_{тр} = -L_{med} - L_d - L_3 - L_{oc}$ - сумарні втрати на трасі поширення,

$L_{med} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)$ - медіанні втрати, $L_d = 0$ [дБ] - дифракційні втрати

(поширення сигналу відбувається у вільному просторі), L_3 - зменшення потужності сигналу за рахунок завмирання, $L_{oc} = \gamma_d R_{эф}$ - ослаблення сигналу за рахунок дощу, $R_{эф}$ - ефективна довжина дощового утворення, γ_d - погонне загасання в дощових утвореннях;

$W = G_{np} - \Delta G_{np} - K_{вт} - L_{fnp}$ - сумарне посилення приймальної антени, G_{np} - коефіцієнт посилення приймальної антени, ΔG_{np} - зменшення коефіцієнта посилення приймальної антени в напрямку передавача, $K_{вт}$ - втрати потужності сигналу, що відбуваються через вплив неузгодженості по поляризації і ступеня поляризації прийнятих електромагнітних хвиль, L_{fnp} - втрати в фідері приймального тракту.

У зв'язку з тим, що в реальній ситуації в супутникових системах зв'язку, особливо при дощових утвореннях спостерігаються деякі невідповідності поляризаційних параметрів хвилі параметрам приймальної антени, розроблена методика розрахунку втрат потужності сигналу, що відбуваються через вплив неузгодженості по поляризації і ступеня поляризації прийнятих електромагнітних хвиль. Відповідно до даної методики розраховується коефіцієнт поляризаційного прийому каналу передачі корисного сигналу

$$K_{кан_1} = \frac{1 + m_1 \cdot (2 \cos^2 \delta_1 - 1)}{2}, \quad (2)$$

де m_1 - індекс поляризації сигналу, δ_1 - кут неузгодженості між поляризаційним вектором сигналу і приймальною антеною основного каналу. Тоді втрати при прийомі сигналу

$$K_{вт_с} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{K_{кан_1}}. \quad (3)$$

Коефіцієнт поляризаційного прийому ортогонального каналу передачі

$$K_{кан_2} = \frac{1 + m_2 \cdot (2 \cos^2 (90^\circ - \delta_2) - 1)}{2}, \quad (4)$$

m_1 - індекс поляризації завади, δ_2 - кут між поляризаційним вектором завади і антени ортогонального каналу. А втрати прийому завади складуть

$$K_{\text{вт}_3} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{K_{\text{кан}_2}}. \quad (5)$$

Далі відповідно з методом аналізу ЕМС розраховуються такі показники:

- відношення потужності сигналу до шуму h^2 :

$$h^2 = P_{\text{пр}_c} - N; \quad (6)$$

- відношення потужності завади до шуму

$$g^2 = P_{\text{пр}_z} - P(\Delta f, B) - \Delta K - N, \quad (7)$$

$P(\Delta f, B)$ - поправка на розбіжність робочих частот, ΔK - поправка на ширину смуги частот каналу, N - чутливість приймача;

- відношення сигнал / (завада + шум) (ВСЗШ):

$$\text{ВСЗШ} = h^2 - g^2, \text{ дБ}. \quad (8)$$

В роботі проведено аналіз внутрішньосистемної ЕМС супутникової системи зв'язку стандарту DVB-S2. Вихідні дані для проведення аналізу надано в табл.1.

Таблиця 1. Вихідні дані для проведення аналізу ЕМС

Характеристики передавача транспондера 65 (корисний сигнал):	Характеристики приймача транспондера 65:	Характеристики передавача транспондера 64 (завада):
Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність: $P_{\text{ЕІВП}}=52$ дБВт;	Коефіцієнт посилення антени: $G_{\text{пр65}} = 39,8$ дБ;	Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність: $P_{\text{ЕІВП}} = 52$ дБВт;
Частота передавача: $f_{65} = 12015$ МГц;	Частота приймача $f_{65} = 12015$ МГц;	Частота передавача: $f_{64} = 11996$ МГц;
Смуга пропускання на рівні 3 дБ: 36 МГц;	Смуга пропускання на рівні 3 дБ: 36 МГц;	Смуга пропускання на рівні 3 дБ: 36 МГц;
Поляризація - горизонтальна.	Поляризація - горизонтальна.	Поляризація - вертикальна.
	Коефіцієнт шуму $k_{\text{ш}} = 0,7$;	
	Необхідне ВСЗШ в системі: 7,8 дБ;	

Проведено аналіз впливу індексу поляризації і кута неузгодженості на ВСЗШ. На рис.5 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексах поляризації завади $m_2 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$, що відповідає частково поляризованій заваді. Дані залежності отримані при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,95$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 0^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ для DVB-S2 7,8 дБ

досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 21^\circ$.

Рис. 5. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,95$ і $m_2 = 0,1$

Рис. 6. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$

Рис. 7. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,95$ і $m_2 = 0,1$

На рис.6 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,95$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 50^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ для DVB-S2 досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 11^\circ$. На рис.7 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,95$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 90^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ для DVB-S2 не досягається ні при яких умовах.

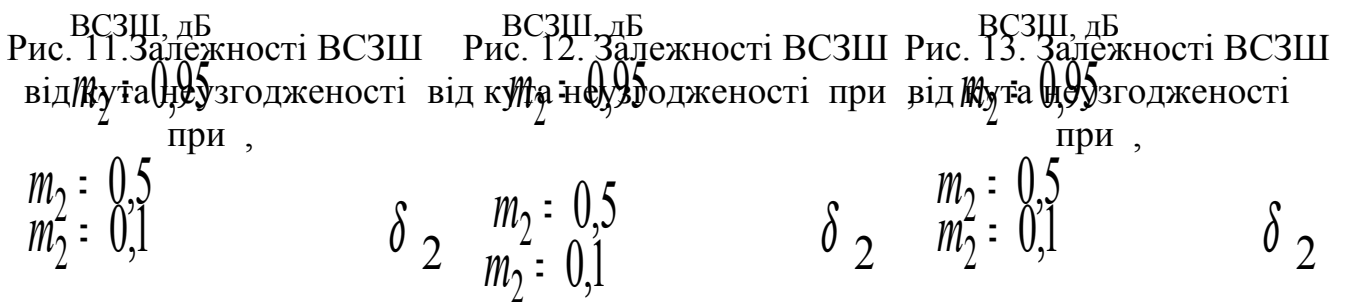
Рис. 8. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$

Рис. 9. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$

Рис. 10. Залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при $m_1 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$

На рис.8 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексах поляризації завади, $m_2 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$, що відповідає частково поляризованій заваді. Дані залежності отримані при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,5$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 0^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ для DVB-S2 7,8 дБ

досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 20^\circ$. На рис.9 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,5$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 50^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 12^\circ$. На рис. 10 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,5$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 90^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 5^\circ$.



На рис.11 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексах поляризації завади, $m_2 = 0,95$, $m_2 = 0,5$ і $m_2 = 0,1$. Дані залежності отримані при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,1$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 0^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 15^\circ$. На рис.12 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,1$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 50^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 13^\circ$. На рис.13 представлені залежності ВСЗШ від кута неузгодженості завади δ_2 при індексі поляризації сигналу $m_1 = 0,1$ і куту неузгодженості сигналу $\delta_1 = 90^\circ$. З даних графіків видно, що мінімально допустиме ВСЗШ досягається за умови, що індекс поляризації завади $m_2 \geq 0,95$, а кут неузгодженості завади $\delta_2 \leq 12^\circ$.

Проведений аналіз електромагнітної сумісності показав, що в більшості випадків умови забезпечення ЕМС можуть порушуватися. Тому необхідна розробка заходів щодо забезпечення ЕМС супутникових систем зв'язку.

У четвертому розділі для забезпечення внутрішньосистемної ЕМС супутникової системи зв'язку розроблено метод адаптивної компенсації крос-поляризаційних завад із суміжних каналів.

На рис. 14 представлена структурна схема 2-х каналного адаптивного компенсатора завад (АКЗ), у якого в якості ортогонального використовується сигнал сусіднього каналу. Для вирішення задачі оцінки вагового коефіцієнта використана формалізація фільтра Калмана-Б'юсі.

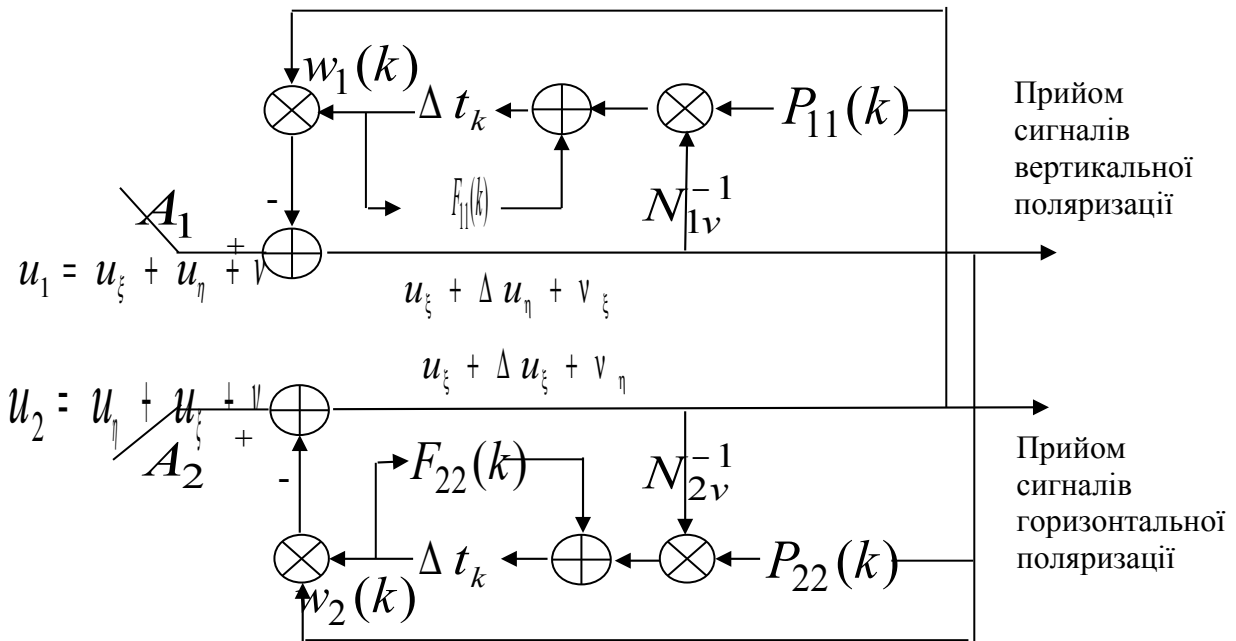


Рис.14. Схема включення адаптивних компенсаторів завад при наявності в 1 і 2 каналах перехідних завад

Відповідно до даної схеми оцінки вагового коефіцієнта в i -му каналі ($i = 1, 2$) на $k + 1$ -му кроці здійснюється за процедурою:

$$\hat{w}_i(k+1) = F_{ii}(k)\hat{w}_i(k) + K_i(k)[u_i(k) - \hat{w}_i(k)F_{ii}(k)u_j(k)], \quad (9)$$

де $j = 2, 1$, $u_i(k)$ - адитивна суміш сигналу, завади з сусіднього каналу і шуму в i -му каналі, $u_j(k)$ - адитивна суміш в j -му каналі, $K(k)$ - коефіцієнт, який підлягає рекурсивному обчисленню на кожному кроці згідно алгоритму:

$$K_i(k+1) = P_{ii}(k)u_j(k)N_{iv}^{-1},$$

N_{iv} - спектральна густина шуму $v(k)$ в i -му каналі.

Апостеріорна дисперсія підлягає рекурсивному обчисленню на кожному кроці згідно алгоритму:

$$P_{ii}(k+1) = F_{ii}(k+1)P_{ii}(k)F_{ii}^T(k+1) + G_{ii}(k)N_{ju}G_{ii}^T(k),$$

де $F(k)$, $G(k)$ - коефіцієнти стану та інтенсивності змін параметрів вагового коефіцієнта відповідно; N_{ju} - спектральна густина потужності завади $u_j(k)$ в j -му каналі. Рівняння для апріорної дисперсії:

$$V_{ii}(k+1) = [I - K_i(k)u_j(k)]P_{ii}(k+1).$$

За допомогою математичного моделювання проведено аналіз ефективності адаптивного компенсатора завад крос-поляризаційних спотворень. Для отримання чисельних значень в якості вихідних взяті наступні співвідношення між рівнями прийнятих в основному каналі реалізацій: відношення сигнал/шум $h^2_{oc} = 49$ дБ, що відповідає індексу поляризації $m_1 = 0,95$ та куту неузгодженості $\delta_1 = 0^\circ$; відношення завада/шум $g^2_{oc} = 34$ дБ, що відповідає індексу поляризації $m_2 = 0,95$ та куту неузгодженості $\delta_2 = 0^\circ$. У результаті машинного експерименту отримана залежність ВСЗШ на виході АКЗ від дискретного часу

Рис. 15. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від дискретного часу

дискретного часу (рис.15). Верхня крива відповідає залежності ВСЗШ на виході АКЗ при потужності сигналу в ортогональному каналі $g^2_{opt} = 46$ дБ при індексі поляризації $m_2 = 0,95$ та куту неузгодженості $\delta_2 = 0^\circ$ (в ортогональному каналі цей сигнал є корисним). Середня крива відповідає залежності ВСЗШ на виході АКЗ при потужності сигналу в ортогональному каналі $g^2_{opt} = 43,5$ дБ при індексі поляризації $m_2 = 0,5$ та куту неузгодженості $\delta_2 = 0^\circ$. Нижня крива відповідає залежності ВСЗШ на виході АКЗ при потужності сигналу в ортогональному каналі $g^2_{opt} = 34$ дБ при індексі поляризації $m_2 = 0,1$ та куту неузгодженості $\delta_2 = 0^\circ$. З даних графіків видно, що після закінчення деякого часу перехідного процесу ВСЗШ на виході АКЗ досягає свого потенційного значення. Крім того можна зробити висновок, що при збільшенні індексу поляризації і збільшенні потужності сигналу в ортогональному каналі ВСЗШ на виході АКЗ збільшується.

Отримано залежності ВСЗШ на виході АКЗ від співвідношення потужностей завади в ортогональному каналі $P_{з.орт}$ до потужності завади в основному каналі $P_{з.ос}$. На рис.16 представлена залежність ВСЗШ від відношення $P_{з.орт}/P_{з.ос}$ при куті неузгодженості $\delta_2 = 0^\circ$. Крива на рис.17 відповідає залежності ВСЗШ від відношення $P_{з.орт}/P_{з.ос}$ при куті неузгодженості $\delta_2 = 10^\circ$. Крива на рис.18 відповідає залежності ВСЗШ від відношення $P_{з.орт}/P_{з.ос}$ при куті неузгодженості $\delta_2 = 20^\circ$. З даних графіків

впливає, що з підвищенням потужності завади в ортогональному каналі ВСЗШ плавно зростає, і при $P_{з.орт} / P_{з.ос} \geq 6 \dots 10$ дБ досягає практично граничних значень, що на практиці зазвичай виконується.

ВСЗШ, дБ

Рис.16. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від відношення / при куті неузгодженості

Рис.17. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від відношення / при куті неузгодженості

Рис.18. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від відношення / при куті неузгодженості

Даний факт має важливе практичне значення при виборі параметрів ортогонального каналу прийому. Іншими словами: щоб АКЗ мав високу ефективність, рівень завади в його ортогональному каналі прийому повинен перевищувати рівень завади, що компенсується в основному каналі на 6 ... 10 дБ. З отриманих графіків можна також зробити висновки про те, що на ефективність роботи алгоритму істотно впливає кут неузгодженості.

○ ○ П Ш, дБ

дБ

Рис. 19. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від дискретного часу при різних рівнях корисного сигналу в ортогональному каналі

время

Домогтися повної відсутності корисного сигналу в ортогональному каналі дуже важко. Це призводить до втрат ефективності АКЗ, бо разом з завадою компенсується і корисний сигнал. На рис. 19 показані залежності ВСЗШ на виході АКЗ від дискретного часу при різних рівнях корисного сигналу в ортогональному каналі. Дані залежності отримані при потужності сигналу в основному каналі $P_{с осн} = 49$ дБ. Верхня крива на цьому рисунку відповідає $P_{с орт} = 0$ дБ. Друга зверху крива відповідає $P_{с орт} = 10$ дБ. Третя зверху крива відповідає $P_{с орт} = 25$ дБ. Четверта зверху крива відповідає $P_{с орт} = 40$ дБ. Хід кривих свідчать про те, що просочування сигналу в ортогональний канал призводить до втрати ефективності АКЗ.

Проведено аналіз залежності ВСЗШ на виході АКЗ від ВСЗШ на його вході (рис.20). З даного графіка видно, що ВСЗШ на виході АКЗ залежить лінійно від ВСЗШ на його вході і дає вигреш в 20 дБ.

Рис.20. Залежність ВСЗШ на виході АКЗ від ВСЗШ на його вході

ВСЗШ на вході АКЗ, дБ

перетворювач частоти 14, підсилювач проміжної частоти 16, детектор 17, керуючий процесор 18, підсилювач з керованим коефіцієнтом передачі пропорційним $\sin\alpha$ 8, другий фазообертач 4, підсилювач з керованим коефіцієнтом передачі пропорційним $\cos\beta$ 9, третій фазообертач 5, підсилювач з керованим коефіцієнтом передачі пропорційним $\sin\beta$ 10, четвертий фазообертач 6, перший 13 та другий 15 гетеродин, подільник потужності 12.

Значення необхідних параметрів встановлюється керуючим процесором 18, що дозволяє адаптувати поляризаційні характеристики до зміни погодних умов і дозволяє підвищити надійність зв'язку.

Для організації каналів розроблена приймально-передавальна антена з керованою поляризацією. Вона складається (рис.21) з антенного блоку А та блоку обробки сигналів. Приймально-передавальна антена з керованою поляризацією містить параболічний сфокусовувач та випромінювач, перший 1 та другий 2 антенний перемикач, перший фазообертач 3, підсилювач з керованим коефіцієнтом передачі пропорційним $\cos\alpha$ 7, підсумовуючий пристрій 11,

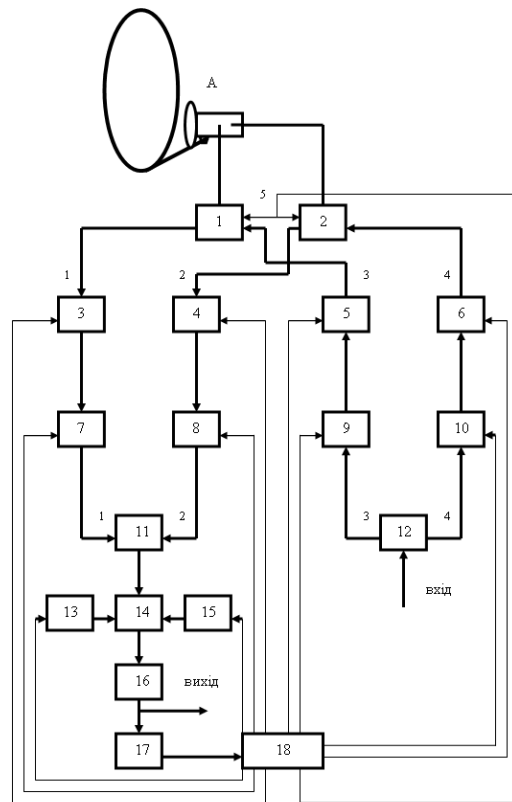


Рис.21. Схема антени з керованою поляризацією

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. В даний час вимоги до якості каналів супутникового зв'язку постійно зростають, як і потреба в цих каналах. Не малу роль в цьому процесі відіграє поступовий перехід операторів супутникового телебачення до стандарту

DVB-S2, який дозволяє транслювати телевізійні канали високої чіткості. Разом з тим, зростає потреба в більш високих швидкостях передачі даних, отже, і в збільшенні смуги частот транспондерів, що знаходяться на борту штучного супутника Землі. Одним з обмежень у досягненні цих потреб є наявність взаємного впливу каналів зв'язку, тобто наявність порушень внутрішньосистемної електромагнітної сумісності. Однією зі складових цього впливу виступають крос-поляризаційні спотворення.

2. Проведений огляд показав, що загальна смуга частот транспондерів супутника складає 1753 МГц. Смуга пропускання кожного транспондера на рівні 3 дБ складає від 26 до 54 МГц в залежності від конструкції транспондера. Рознос частот між несучими частотами транспондерів становить 19 МГц, що не дає запасу для виконання умов електромагнітної сумісності.

3. Проведено натурні експериментальні дослідження крос-поляризаційної структури сигналу при впливі гідрометеорів у вигляді дощу. Аналіз даних вимірювань показав, що при впливі гідрометеорів у вигляді дощу інтенсивністю 0,0 – 30,0 мм/год рівень крос-поляризаційної вибіркості змінювався від 30,9 до 10,5 дБ, при цьому відношення сигнал/шум змінювалося від 12,4 до 3,5 дБ. Аналіз показав, що зі збільшенням відношення сигнал/шум в прямому каналі збільшується і крос-поляризаційна вибіркості. Також дослідним шляхом було встановлено, що мінімальне значення відношення сигнал/шум, для задовільної роботи системи, становить 5,1 дБ (вірно для стандарту DVB-S).

4. Проведено тестування моделей крос-поляризаційної вибіркості і загасання внаслідок дощу. Тестування моделей UTI-R, FUK і DHW, було проведено при використанні параметрів супутників Olympus і Hot Bird 8. Тестування моделей показало, що модель FUK найбільш близька до вимірювань, зробленим в Харкові. В процесі аналізу результатів вимірювань виявлено кореляційний зв'язок між крос-поляризаційною вибіркостію і загасанням, внаслідок впливу на канал зв'язку гідрометрів у вигляді дощу.

5. Удосконалено метод аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникової системи зв'язку. Метод враховує втрати потужності сигналу і крос-поляризаційної завади, що відбуваються через вплив неузгодженості по поляризації і ступеня поляризації прийнятих електромагнітних хвиль. Метод аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності дозволить при проектуванні або функціонуванні супутникової системи зв'язку робити вибір кращих з точки зору електромагнітної сумісності каналів. Практичне застосування методу аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності підвищить якість зв'язку в системі супутникового цифрового телебачення.

6. Проведено аналіз ЕМС двох суміжних по частоті каналів: транспондера 65 і транспондера 64. Проведений аналіз електромагнітної сумісності показав, що в більшості випадків умови забезпечення ЕМС можуть поруватися.

7. Розроблено структуру адаптивного компенсатора кросс-поляризаційних спотворень. Для вирішення задачі оцінки вагового коефіцієнта використана формалізація фільтра Калмана-Б'юсі. Розроблено структурну схему багатоканального приймача з адаптивним компенсатором завад.

8. Проведено аналіз ефективності адаптивної компенсації кросс-поляризаційних спотворень. Аналіз показав, що при збільшенні індексу поляризації і збільшення потужності завади в ортогональному каналі ВСЗШ на виході АКЗ підвищується.

9. Проведений аналіз показав, що з підвищенням потужності завади в ортогональному каналі ВСЗШ плавно зростає. При відношенні потужності завади в ортогональному каналі до потужності завади в основному каналі $P_{n.орт} / P_{n.ос} \geq 6...10$ дБ ВСЗШ досягає практично граничних значень, що на практиці зазвичай виконується.

10. Домогтися повної відсутності корисного сигналу в ортогональному каналі дуже важко. Це призводить до втрат ефективності АКЗ, бо разом з перешкодою компенсується і корисний сигнал.

11. Проведено аналіз залежності ВСЗШ на виході АКЗ від ВСЗШ на його вході. Аналіз показав, що ВСЗШ на виході АКЗ залежить лінійно від ВСЗШ на його вході і дає вигреш в 20 дБ.

12. Розроблено структуру адаптивної компенсації внутрішньосистемних завад у супутникових системах зв'язку. Для організації каналів адаптивного компенсатора завад розроблена антена з керованою поляризацією. Значення параметрів адаптації встановлюється керуючим процесором, що дозволяє адаптувати поляризаційні характеристики до зміни погодних умов і дозволяє підвищити надійність зв'язку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ельченко С.В. Результаты исследования кросс-поляризационной структуры сигнала в спутниковых линиях связи/С.В.Ельченко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2011.№2 (50),. С.26-28.

2. Ельченко С.В. Результаты тестирования моделей кросс-поляризационной избирательности и затухания в следствии дождя /С.В.Ельченко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2011. №4 (52),. С.38-41.

3. Ельченко С.В. Адаптивная компенсация кросс-поляризационных искажений/С.В.Ельченко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2011.№6 (54),. С.63-65.

4. Коляденко Ю.Ю. Анализ эффективности адаптивного компенсатора кросс-поляризационных искажений [Електронний ресурс] / Ю.Ю. Коляденко, С.В. Ельченко // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 3 (5). – с. 58–66. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_kolyadenko_compensation.pdf.

5. Мартычук А.А. Методика анализа внутрисистемной электромагнитной совместимости систем спутникового телевизионного вещания [Электронный ресурс] / Мартычук А.А. Коляденко Ю.Ю. Ельченко С.В.//Проблемы телекоммуникаций.–2012.– № 1(6). – С. 58–66. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_kolyadenko_compensation.pdf.

6. Ельченко С.В. Тестирование XPD-CPA моделей // 4-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" Том 2. Международная конференция "Телекоммуникационные системы и технологии". - 2011.-Том 2. С .226-228.

7. Ельченко С.В. Результаты исследования кросс поляризационных помех в спутниковых линиях связи Ku диапазона // Международная научная конференция "Актуальные вопросы регулирования в сфере телекоммуникаций и использования радиочастотного ресурса".- 2010. С.73-74.

8. Ельченко С.В. Статистическая обработка результатов измерения поляризационных параметров сигналов в системах спутниковой связи / С.В. Ельченко // Материалы XVI Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Харьков, 2012. С. 52-53.

АНОТАЦІЇ

Ельченко С.В. Методы обеспечения электромагнитной совместимости спутниковых систем связи. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков. 2012.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи обеспечения электромагнитной совместимости и повышения помехоустойчивости спутниковых систем связи.

Проведены натурные экспериментальные исследования кросс-поляризационной структуры сигнала при влиянии гидрометеоров в виде дождя. Анализ данных измерений показал, что при воздействии гидрометеоров в виде дождя интенсивностью 0.0 – 30.0 мм/ч уровень кросс поляризационной избирательности изменялся от 30.9 до 10.5 дБ, при этом отношение сигнал шум изменялось от 12.4 до 3.5 дБ. Анализ показал, что с увеличением отношения сигнал/шум в прямом канале увеличивается и кросс-поляризационная избирательность.

Проведено тестирования моделей кросс-поляризационной избирательности и затухания вследствие дождя. Тестирование моделей UTI-R, FUK и DHW, было проведено при использовании параметров спутников Olympus и Hot Bird 8. Тестирование моделей показало, что модель FUK наиболее близка к измерениям, произведенным в Харькове. В процессе анализа результатов измерений обнаружена корреляционная связь между кросс-поляризационной избирательностью и затуханием, вследствие воздействия на канал связи гидрометеоров в виде дождя.

Усовершенствован метод анализа внутрисистемной электромагнитной совместимости спутниковой системы связи. Метод учитывает потери мощности сигнала и кросс-поляризационной помехи, происходящие из-за влияния рассогласования по поляризации и степени поляризации принимаемых электромагнитных волн.

Произведен анализ ЭМС двух смежных по частоте каналов: транспондера 65 и транспондера 64. Проведенный анализ электромагнитной совместимости показал, что в большинстве случаев условия обеспечения ЭМС могут нарушаться.

Разработана структура адаптивного компенсатора кросс-поляризационных искажений. Для решения задачи оценки весового коэффициента использована формализация фильтра Калмана–Бьюси. Разработана структурная схема многоканального приемника с адаптивным компенсатором помех.

Проведен анализ эффективности адаптивной компенсации кросс-поляризационных искажений. Анализ показал, что при увеличении индекса поляризации и увеличении мощности помехи в ортогональном канале ОСПШ на выходе АКП повышается.

Разработана структура адаптивной компенсации внутрисистемных помех в спутниковых системах связи. Для организации каналов адаптивного компенсатора помех разработана антенна с управляемой поляризацией. Значения параметров адаптации устанавливается управляющим процессором, что позволяет адаптировать поляризационные характеристики к изменению погодных условий и позволяет повысить надежность связи.

Ключевые слова: спутниковая система связи, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, поляризационно-временная обработка сигналов, компенсатор помех.

Єльченко С.В. Методи забезпечення електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку. - Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків. 2012.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі забезпечення електромагнітної сумісності та підвищення завадостійкості супутникових систем зв'язку.

Проведено натурні експериментальні дослідження крос-поляризаційної структури сигналу при впливі гідрометеорів у вигляді дощу. Проведено тестування моделей крос-поляризаційної вибіркості і загасання внаслідок дощу.

Удосконалено методику аналізу внутрішньосистемної електромагнітної сумісності супутникових систем зв'язку. Методика враховує втрати потужності сигналу і крос-поляризаційної завади, що відбуваються через

вплив неузгодженості по поляризації і ступеня поляризації прийнятих електромагнітних хвиль.

Розроблено структуру адаптивної компенсації внутрішньосистемних завад у супутникових системах зв'язку. Для організації каналів адаптивного компенсатора завад розроблена антена з керованою поляризацією. Значення параметрів адаптації встановлюється керуючим процесором, що дозволяє адаптувати поляризаційні характеристики до зміни погодних умов і підвищити надійність зв'язку.

Ключові слова: супутника система зв'язку, завадостійкість, електромагнітна сумісність, поляризаційно-часова обробка сигналів, компенсатор завад.

Yelchenko S.V. Methods of ensuring the electromagnetic compatibility of satellite communication systems. - Manuscript. Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.12.02 - telecommunications systems and networks. Kharkov National University of Radio Electronics. Kharkov. 2012.

The thesis is devoted to solving the urgent scientific task of ensuring electromagnetic compatibility and improve the noise immunity of satellite communication systems.

Conducted full-scale experimental studies of cross-polarization signal structure under the influence of hydrometeors in the form of rain. A test model of cross-polarization selectivity and attenuation due to rain.

Improved method of analysis of intrasystem electromagnetic compatibility of satellite communication systems. The method takes into account the loss of signal power and cross-polarization interference occurring due to the mismatch effect on the polarization and the degree of polarization of the received electromagnetic waves.

The structure of adaptive compensation of intra-interference in satellite communication systems. For the organization of an adaptive channel equalizer noise designed antenna with controlled polarization. The values of the parameters of the control is set to adapt the processor that allows you to adapt to changes in the polarization characteristics of the weather conditions and improve reliability.

Key words: communication satellite system, noise immunity, electromagnetic compatibility, polarization-time signal processing, noise canceller.

Підп. до друку. 31.05.12. Формат 60x84^{1/16}. Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 0,9. Тираж 100 экз.
Зам. № 2-299. Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14