

здійснено аналіз методів побудови низькоорбітальних мережних супутникових систем передавання даних.

Запропоновано алгоритм розрахунку орбітальних груп і наведено методи оптимального прийому неортогональних багатопозиційних сигналів.

#### Список використаної літератури

1. Ким, А. В. Новый мобильный горизонт: итоги MWC-13 / А. В. Ким, В. О. Тухвинский // Электросвязь.— 2013.— № 3.

2. Тухвинский, В. О. LTE World Summit-2013: на пути к 5G / В. О. Тухвинский, В. Я. Архипкин // Электросвязь.— 2013.— № 7.

4. Niri, S. G. Towards 5G / S. G. Niri // LTE World Summit-2013.

5. Hardouin, E. 5G: an operator's perspective / E. Hardouin // LTE World Summit-2013.

6. Osseiran, A. The 5G Mobile and Wireless Communications: Challenges and Scenarios / A. Osseiran // LTE World Summit-2013.

7. Стеклов, В. К. Проективання телекомунікаційних мереж: підручник для вузів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман.— К.: Техніка, 2002.— 848 с.

8. Толубко, В. Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високого порядку / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков // Зв'язок.— 2016.— №4.— С. 5–7.

9. Козелкова, Е. С. Методика повышения качества моделирования многоспутниковой низкоорбитальной экологической системы ДЗЗ: монография.— К.: ЦНИИИиУ, 2005.— 120 с.

Рецензент: доктор техн. наук, професор В. А. Дружинін, Державний університет телекомунікацій, Київ.

В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков

#### ЭФФЕКТИВНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СЕТЬ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ (IMT-2020)

Проанализированы технические проблемы, касающиеся создания мобильной сети 5-го поколения (5G) и предложен подход к их решению на основе использования наноспутников и разработанных методов оптимального приема неортогональных многопозиционных сигналов.

**Ключевые слова:** мобильная связь; спутники; сигналы Созвездия; технологии; сеть 5G; универсальный транслятор; транспортная сеть; демодулятор.

V. B. Tolubko, L. N. Berkman, S. V. Kozelkov

#### THE EFFECTIVE TRANSPORT FIFTH GENERATION MOBILE NETWORK (IMT-2020)

The technical problems with creating 5G mobile network are analysed as well as the approach to solving them on the base of nano-satellites and by means of nonorthogonal multiposition signals optimal reception methods is proposed.

**Keywords:** mobile network; satellites; Constellation signals; technologies; 5G network; universal translator; transport network; demodulator.

УДК 621.396.6

М. М. СТЕПАНОВ, доктор техн. наук, ст. наук. співробітник;

Державний університет телекомунікацій, Київ

Т. В. УВАРОВА, канд. техн. наук,

Національний університет оборони України, Київ

## Розв'язання проблеми електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів систем мобільного зв'язку стандартів 4G і 5G

**Розглянуто новітні тенденції розвитку телекомунікацій та вимоги до стандартів мобільного зв'язку 4-го і 5-го покоління. Запропоновано математичну модель оцінювання стійкості функціонування систем мобільного зв'язку при електромагнітних взаємодіях радіоелектронних засобів (РЕЗ), що вводяться в систему, яка дозволяє розглядати точки рівноваги системи при взаємодії різних РЕЗ, а також аналізувати її поведінку при конкретному виборі значень керуючих параметрів із урахуванням наявних ресурсів.**

**Ключові слова:** стандарти мобільного зв'язку 4G і 5G; радіоелектронні засоби; електромагнітна сумісність.

#### Вступ

Сьогодні телекомунікаційна індустрія перебуває в перехідному стані, коли трансформація індустріальної епохи в епоху інформаційну практично закінчилась, а інформаційна епоха, тільки-но розпочавшись, перейшла до свого завершення, тобто час її розвитку попрямував до нуля (рис. 1).

© М. М. Степанов, Т. В. Уварова, 2016

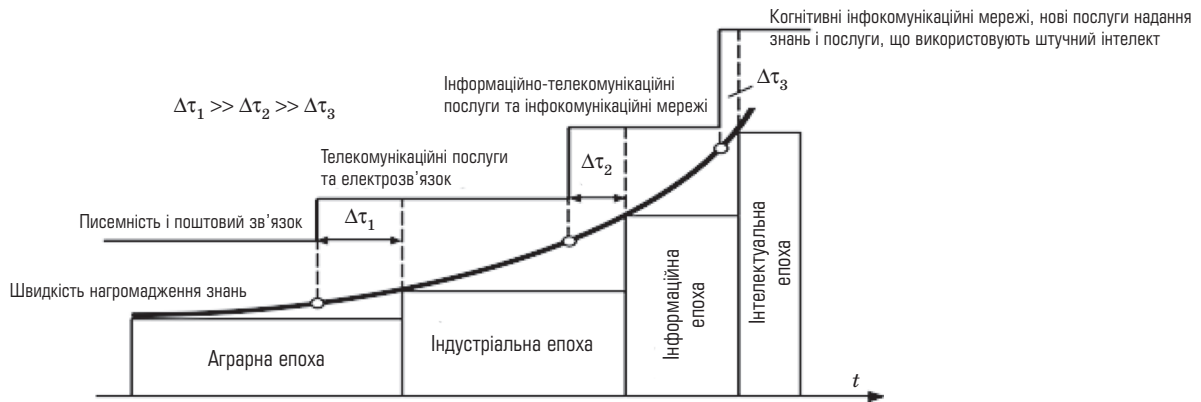


Рис. 1. Зміна епох суспільного розвитку

Варто зазначити, що за останні 10 років кількість пристроїв, підімкнених до інтернету, зросла майже в 100 разів. Уже тепер, із розвитком технічних вирішень стосовно інтелектуалізації апаратних засобів до мережі Інтернет почнуть під'єднувати дедалі більше пристроїв — від засобів транспорту до побутової техніки та одягу, а кількість одночасних підімкнень може досягати 100 млрд. Через це споживання трафіку користувачами вже незабаром зросте не менш як у 1000 разів.

Так, Cisco прогнозує 18-кратне зростання обсягу мобільного трафіку протягом 2012–2017 років. А до 2017 року обсяг хмарного трафіку, що передається по мобільних мережах, становитиме 71% від усього мобільного трафіку, або 7,6 екзабайт на місяць (для порівняння: у 2011 році на хмарний трафік припадало 45% від загального обсягу мобільного трафіку, або 269 петабайт на місяць).

Таким чином, прогнозується стрімке зростання трафіку передавання даних у мережах мобільного зв'язку з відповідним зростанням кількості користувачів (рис. 2).

**Основна частина**

Вочевидь, перехід до стандартів 4G і 5G вкрай необхідний для задоволення потреб користувачів.

Варто зазначити, що покоління мобільного зв'язку 4G характеризується підвищеними можливостями щодо швидкості передавання даних: понад 100 Мбіт/с для рухомих і 1 Гбіт/с — для стаціонарних абонентів.

Відповідний стандарт включає в себе такі технологічні рішення, як LTE Advanced (LTE-A) і WiMAX 2, офіційно визнані безпроводовими стандартами зв'язку 4G (IMT-Advanced) Міжнародним союзом електрозв'язку на конференції в Женеві 2012 року.

Головні дослідження при створенні систем зв'язку 4G ведуться в напрямку використання технології ортогонального частотного уцілювання OFDM. Окрім того, для забезпечення максимальної швидкості передавання використовується технологія MIMO, що передбачає передавання даних за допомогою N антен і їх прийом за допомогою M антен.

Системи зв'язку 4G базуються на пакетних протоколах передавання даних, таких як IPv4 та IPv6.

Найважливіші вимоги до специфікації IMT-Advanced такі:

- ◆ використовується комутація пакетів та протоколи IP;
- ◆ пікові швидкості передавання даних від 100 Мбіт/с для користувачів із високою (від 10 до 120 км/год) мобільністю і від 1 Гбіт/с для користувачів із низькою (до 10 км/год) мобільністю;
- ◆ динамічно використовуються колективні мережні ресурси для підтримки більшої кількості одночасних підімкнень до одного стільника;
- ◆ смуга пропускання каналу дорівнює 40 МГц;
- ◆ мінімальні значення для пікової спектральної ефективності становлять 15 (біт/с): Гц у низхідному каналі і 6,75 (біт/с): Гц у висхідному каналі (передбачається, що швидкість передавання інформації 1 Гбіт/с в низхідному каналі можлива при смузі пропускання радіоканалу менш як 67 МГц);
- ◆ спектральна ефективність на сектор у низхідному каналі становить від 1,1 до 3 (біт/с): Гц і у висхідному каналі від 0,7 до 2,25 (біт/с): Гц;

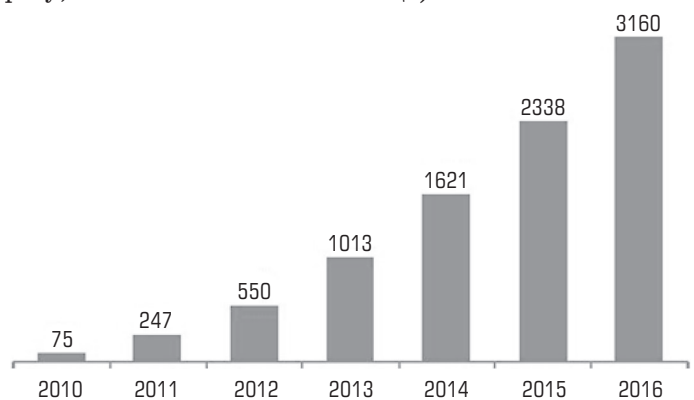


Рис. 2. Темпи зростання обсягу передавання даних, петабайт, протягом 2010–2016 років

- ◆ плавний хендовер через різні мережі;
- ◆ висока якість мобільних послуг.

Телекомунікаційний стандарт зв'язку 5G, або IMT-2020, належить до абсолютно нового покоління стандартів, не ратифікованого МСЕ, що перебуває в розробці. У червні 2015 року МСЕ розробив план його розвитку і визначив згадувану назву — IMT-2020. Упровадження цього стандарту планується до 2020 року.

Лідером у розробці систем стандарту 5G на світовій арені є сьогодні китайська компанія Huawei, яка здійснює великі (близько \$600 млн) інвестиції в цю технологію, що дозволить досягати швидкостей передавання даних понад 10 Гбіт/с.

Перші тести технології 5G проведено в Російській федерації (червень 2016-го) оператором зв'язку Мегафон спільно з Huawei. У вересні МТС при тестуванні на каналі зв'язку було отримано швидкість передавання даних 4,5 Гбіт/с. Інші російські оператори планують тестування технологій 5G спільно з Nokia ще 2016 року.

Основні науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи в цій сфері: PG 5D MCE; Stanford CIS; US SWARN; NYU Wireless; WIN LAB; 5G UK; 5G PPP; METIS; IMT-2020 (5G) Promotion Group; 5G Forum; MOST 86; WISDOM; 2020 and beyond.

Унікальність 5G полягає в тому, що буде використовуватися будь-який спектр і будь-яка технологія доступу, тобто не буде якогось фіксованого радіопараметра, як у сучасних безпроводових мережах. Можливо, зникне поняття роумінгу, а отже, і відповідні витрати абонента (рис. 3).



Рис. 3. Архітектура мобільної мережі 5G

Ключові попередні вимоги до мереж 5G:

- ◆ Зростання швидкості передавання даних у мережах у 10-100 разів у розрахунок на абонента — до 10 Гбіт/с (UL) і до 5 Гбіт/с (DL).
- ◆ Збільшення споживаного абонентом трафіку в 1000 разів — до 500 Гбіт на місяць.
- ◆ Зростання кількості підімкнених абонентських пристроїв у стільнику в 10-100 разів (до 300 000 на вузол).
- ◆ Зростання кількості M2M пристроїв до 500 млрд.
- ◆ Термін життя батареї абонентських пристроїв збільшиться в 10 разів, зросте кількість пристроїв із невеликим енергоспоживанням, таких як сенсори M2M.

◆ Скоротиться принаймні в 5 разів (до 1 мс і менше) час затримки в ланцюжку E2E.

◆ Знизиться принаймні на 10% вартість експлуатації та енергоспоживання мереж 5G порівняно з мережами 4G.

З огляду на лавиноподібне збільшення кількості абонентів у мобільній мережі, а також трафіку передавання даних постає проблема щодо забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) РЕЗ мобільного зв'язку у процесі їх взаємодії.

Для забезпечення ЕМС РЕЗ мобільного зв'язку в процесі їх взаємодії при введенні нових пристроїв пропонується така математична модель оцінювання стійкості функціонування зазначених систем:

$$\Phi_i \left( \psi_j; C_k; t; \frac{d\psi_j}{dt}; \frac{d^2\psi_j}{dt^2}; \dots \right) = 0. \quad (1)$$

Ця модель включає в себе параметри системи, елементи її стану, а також параметри управління нею. Оскільки система мобільного зв'язку — це динамічна система, то вираз (1) можна описати через градієнт:

$$\Phi_i = \frac{d\psi_j}{dt} + \frac{\partial V(\psi_j, C_k)}{\partial \psi_i}. \quad (2)$$

Беручи до уваги такі функціональні характеристики еволюції системи, як

$RX$  — швидкість зменшення ресурсу за рахунок парку РЕЗ, що вводиться в систему;

$X^2Y$  — частина ресурсу, яка прийшла в систему після невдалої спроби системи зберегти стійкість, дістаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = S - (R+1)X + X^2Y; \\ \frac{dY}{dt} = RX - X^2Y, \end{cases} \quad (3)$$

що має вкладатися в рамки Брюсселяторної моделі.

Граф функціональних взаємодій РЕЗ згідно із системою (3) наведено на рис. 4.

Якщо прирівняти швидкості в (3) до нуля, дістанемо рівняння рівноваги динамічної системи:

$$\begin{cases} X = S; \\ Y = \frac{R}{S}. \end{cases} \quad (4)$$

У разі практичної реалізації цієї моделі можливі відхилення від рівноважних станів. Досліджувана система набирає при цьому такого вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x} = x(R-i) + y(S^2) + x^2\left(\frac{R}{S}\right) + 2xyS + x^2y; \\ \dot{y} = y(-R) + y(-S^2) - x^2\left(\frac{R}{S}\right) - 2xyS - x^2y. \end{cases} \quad (5)$$

Здобуту систему необхідно проаналізувати з позицій її стійкості до відхилень параметрів. Обмежившись лінійними щодо  $x$  і  $y$  членами, дістанемо:

$$\begin{cases} \dot{x} = a_{11}x + a_{12}y; \\ \dot{y} = a_{21}x + a_{22}y, \end{cases} \quad (6)$$

де  $a_{11} = R = i$ ;  $a_{21} = -R$ ;  $a_{22} = -S^2$ .

Виконавши відповідні перетворення, запишемо характеристичне рівняння

$$\lambda^2 = \lambda(a_{11} + a_{22}) + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0, \quad (7)$$

коефіцієнти якого задовільняють такі рівності:

$$a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = S^2; \quad (8a)$$

$$-(a_{11} + a_{22}) = 1 + S^2 - R. \quad (8б)$$

Додатне дійсне значення величини (8a) унеможливорює нестійкість, зумовлену перетворенням на нуль першого коефіцієнта.

Другий коефіцієнт перетворюється на нуль при  $R_0 = 1 + S^2$ . Очевидно, при  $R < 1 + S^2$  має місце фокус стійкий, тоді як при  $R > 1 + S^2$  — нестійкий, тобто при  $R = 1 + S^2$  виникає динамічна біфуркація Хопфа, що утворює закритичний граничний цикл. Таким чином, використання в даному випадку параметра  $R$  як керуючого призводить до симетричної конфігурації або, за класифікацією Тома, до катастрофи типу  $A \pm (2K + 1)$ .

### Висновок

Розгляд точок рівноваги системи, що описує взаємодію різних РЕЗ, дозволяє аналізувати цю систему при конкретному виборі значень керуючих параметрів.

### Список використаної літератури

1. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд.— М., 1990.— 128 с.
2. Бородич, С. В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет / С. В. Бородич.— М.: Радио и связь, 1990.— С. 272.
3. Предельно допустимые уровни электромагнитного излучения радиосредств сотовых систем подвижной связи / [А. Л. Бузов, Ю. И. Кольчугин, К. В. Шеполова и др.] // Электросвязь.— 1997.— № 10.— С. 24–27.

Рецензент: доктор техн. наук, професор В. Г. Сайко, Державний університет телекомунікацій, Київ.

М. Н. Степанов, Т. В. Уварова

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТОВ 4G И 5G

Рассмотрены новейшие тенденции развития телекоммуникаций и требования к стандартам мобильной связи 4G и 5G. Предложена математическая модель оценки устойчивости функционирования систем мобильной связи при электромагнитном взаимодействии радиоэлектронных средств (РЭС).

**Ключевые слова:** стандарты мобильной связи 4G и 5G; радиоэлектронные средства; электромагнитная совместимость.

M. M. Stepanov, T. V. Uvarova

### SOLVING THE PROBLEM WITH ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIOELECTRONIC MEANS OPERATING ON THE 4G AND 5G MOBILE STANDARDS

The principal modern trends of telecommunication development and demands to mobile standards 4G and 5G are considered. Moreover the mathematical model for valuing stability of interacting mobile systems is simulated.

**Keywords:** 4G and 5G mobile standards; radioelectronic means; electromagnetic compatibility.