

**А.О.Юрчук**  
**В.В.Конін**, д.т.н.  
**В.М.Шутко**, д.т.н.  
**О.О.Колганова**, к.т.н.  
**О.О. Кучерук**, викладач ККМГ АМУ

## РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СУПУТНИКОВИХ СИГНАЛІВ В МІСЬКИХ УМОВАХ, ЕФЕКТ БАГАТОПРОМЕНЕВОСТІ

Національний авіаційний університет, м. Київ, [alindim@mail.ru](mailto:alindim@mail.ru)

*Проаналізовано розповсюдження супутникових сигналів в міських умовах. Розглядаються основні моделі розповсюдження радіохвиль та природа виникнення спотворень радіонавігаційного сигналу. Побудована в середовищі Matlab наглядна математична модель радіонавігаційного сигналу з ефектом багатопроменевості для супутникової радіонавігаційної системи Galileo.*

**Ключові слова:** багатопроменевість, супутникова навігаційна система.

### Вступ

Розповсюдження супутникового сигналу в міських умовах кардинально відрізняється від умов розповсюдження прямої видимості. Окрім всіх завад і шумів, що розглядаються для випадку прямої видимості, з'являється багато додаткових небажаних ефектів. Наявність великої кількості забудов, високих споруд, труб, структури доріг, можливих перепадів рівня земної поверхні і т.п. призводять до багатократного відображення сигналу. Навіть якщо приймальний пристрій знаходиться в стаціонарному стані, рівень приймаючого сигналу може змінюватись за рахунок відображень від рухомих транспортних засобів. В результаті на приймальну антену практично завжди приходять множина копій сигналу (багато променів – звідси термін “багатопроменевість”) з різними рівнями і різними затримками в часі, як це зображено на рис.1.

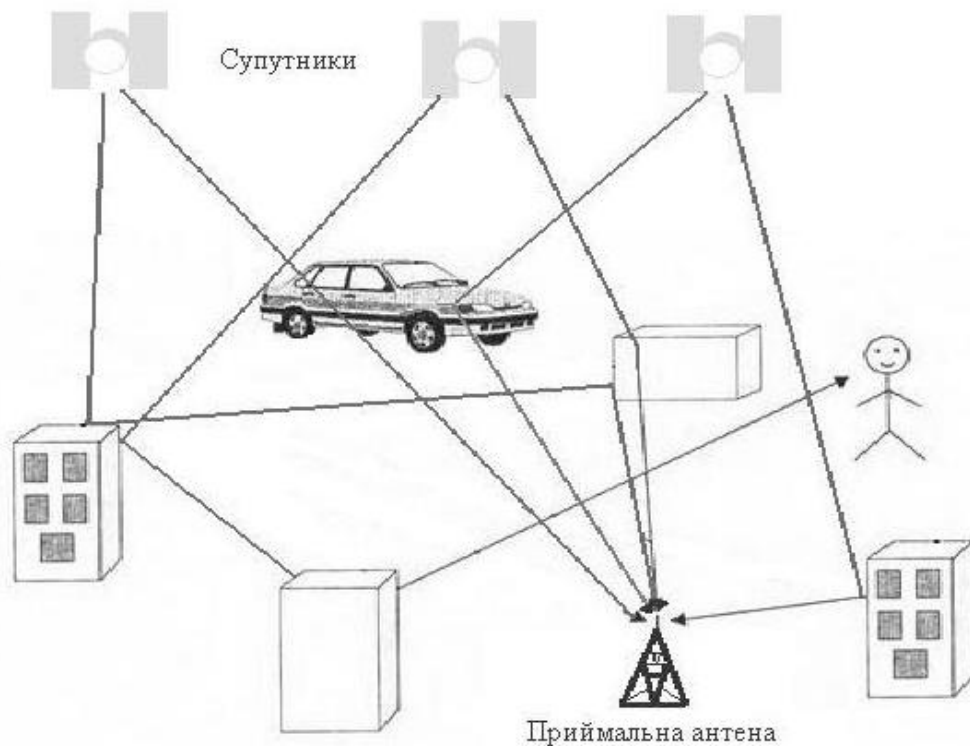


Рис.1 Багатопроменеве розповсюдження сигналу

## **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Багатопроменевість носить випадковий характер, тому усунення цієї похибки повністю неможливо. Причини виникнення і спроби зменшення її впливу на сигнали радіозв'язку та на сигнали супутникових радіонавігаційних систем наводяться в російськомовній літературі [1, 2, 3]. В англомовній літературі опис і зменшення впливу багатопроменевості наводяться в працях [4, 5].

## **Постановка завдання**

Основне завдання полягає в розгляді основних моделей розповсюдження радіохвиль, природи виникнення ефекту багатопроменевості та побудові в середовищі Matlab наглядної математичної моделі радіонавігаційного сигналу з цим ефектом.

В реальних радіонавігаційних каналах діють різноманітні завади, що породжуються зовнішніми джерелами, а також випадкові спотворення. Перш ніж сигнал з'явиться на вході приймача, на нього накладається цілий ряд спотворень, що вносяться середовищем поширення сигналу. До них відносяться загасання, завмирання, внутрішньосимвольна і міжсимвольна інтерференція, доплерівський зсув несучого коливання, нелінійні спотворення, перешкоди між станціями і адитивний шум.

Важливими причинами підвищеного загасання сигналів є тіньові зони, що створюються будівлями або природними височинами на місцевості. Дослідження умов застосування рухливого радіозв'язку в містах показали, що навіть на дуже близьких відстанях тіньові зони дають загасання до 20 дБ. Іншою важливою причиною загасання є листя дерев. Наприклад, в літній час, коли дерева покриті листям, рівень сигналу, що приймається, виявляється приблизно на 10 дБ нижче, ніж в тому ж місці взимку, за відсутності листя. Завмирання сигналів від тіньових зон іноді називають повільними з точки зору умов їх прийому в русі при перетині такої зони. Повільні завмирання сигналів обумовлені зміною умов рефракції радіохвиль, наприклад атмосферні опади, зміна дня і ночі, пір року і т.п.

Причиною швидких завмирань є багатопроменевість поширення радіохвиль. Під багатопроменевістю розуміють існування в каналі великої кількості променів, по яких може поширюватися електромагнітна енергія з передавальної точки в приймальню, в межах діаграм спрямованості антен, причому час проходження сигналу від передавача до приймача по окремих променях різноманітний. Багатопроменевість полягає в тому, що в точку прийому приходять безліч перевідображених променів від місцевих предметів (будівель, автомобілів і так далі), які мають різні фази і амплітуди, а також доплерівські зсуви частоти. Фізично багатопроменевість пояснюється тим, що далеке поширення сигналу в середовищі супроводжується процесами відображення і розсіювання, причому внаслідок динамічного характеру середовища "відбивачі", "розсіювачі" або "неоднорідності середовища" постійно змінюються.

## **Вирішення поставленого завдання**

Виділяють три основні моделі, що зумовлюють характер поширення радіохвиль в реальному середовищі: відображення, розсіювання і дифракцію. Відображення радіохвилі має місце при її падінні на об'єкт, розмір якого значно перевершує довжину хвилі.

Явище дифракції виникає при падінні радіохвиль на перешкоди з гострими кромками (наприклад, дахи будівель, заводські труби і тому подібне), які в цьому випадку є джерелом збудження вторинних хвиль. Дифракція є причиною того, що поширення електромагнітної енергії між передавачем і приймачем може відбуватися не по лінії прямої видимості.

Ефект розсіювання радіохвиль проявляється при їх поширенні в середовищі, насиченому дрібними об'єктами (значно менше довжини хвилі, наприклад, дощ, град і тому подібне). Якщо радіохвиля зустрічається з нерівною поверхнею, то це також призводить до розсіювання або відображення енергії у всіх напрямках. В умовах міста типові перешкоди, що викликають розсіювання, це ліхтарні стовпи, дорожні знаки і навіть листя дерев.

Найкращими умовами для роботи приймачів глобальних навігаційних супутникових систем є відсутність фізичних перешкод для радіосигналу, що приймається з супутника. Існує величезне число факторів довкілля, які можуть перешкоджати прийому необхідних сигналів. Цей феномен називають терміном затінювання. Під зовнішнім затінюванням розуміють будь-

яку зовнішню перешкоду в зоні радіовидимості провідного супутника, яка перешкоджає отриманню сигналу антеною приймача.

Головними причинами затінювання при використанні бортових навігаційних систем є:

- придорожні будівлі (будь-які конструкції на узбіччях проїжджої частини, які перекривають зону радіовидимості супутників);
- мости (затінювання виникає при проходженні транспортного засобу під мостом; тривалість відсутності сигналу залежить від фізичних характеристик моста і швидкості транспортного засобу);
- тунелі (при заїзді в тунель відбувається повне зникнення сигналу; крім того, значно затрудняється прогнозування напрямку руху транспортного засобу, оскільки воно може змінюватися);
- підземні і багатоповерхові автомобільні парковки (перешкоджають роботі приймача так само, як і тунелі; порушення орієнтації залишається тут головною проблемою, особливо на виїзді з парковки, де необхідне миттєве переналаштування приймача відповідно до навігаційних даних відновленого сигналу);
- виїмки (багато доріг прокладаються у виїмках, які створюють фізичні перешкоди для прийому сигналу з низькоорбітальних супутників);
- природний рельєф місцевості (пагорби, гори, долини, дерева і рослинність блокують сигнали залежно від типу, щільності, наявності води, листя і структури стволів/гілок);
- сусідні транспортні засоби (залежно від відносної швидкості транспортних засобів; затінювання може бути короткочасним або тривалим);
- шосейне устаткування (вуличне освітлення, дорожні знаки, естакади; періодичне затінювання, що викликає ефект комплексного переривання сигналу) [6].

Сигнали глобальних навігаційних супутникових систем долають десятки тисяч кілометрів, перш ніж досягнуть антени приймача, при цьому їх потужність невелика (зазвичай - 120 дБм). Потужність деяких з них на 20 дБ нижче рівня фонового шуму, що робить необхідним використання коефіцієнта розширення спектру сигналу (кореляторів) для відділення сигналу від шуму. Проте такий підхід робить сигнали особливо вразливими до радіоперешкод від інших джерел. Система запалення, управління і електронна система транспортного засобу, а також інші комунікаційні пристрої (наприклад: мобільні телефони і системи радіозв'язку) можуть створювати паразитні радіосигнали, що засмічують канал приймача. Під цим стороннім шумом розуміють радіоперешкоди.

Ефект багатоприменовості зазвичай виникає у поєднанні з одним або декількома з вищезгаданих чинників. Приймачі відстежують декілька варіантів одного і того ж сигналу, але з різними траєкторіями проходження, внаслідок відображення від довколишніх об'єктів. Приймач намагається відрізнити реальний сигнал від відбитого. В результаті може бути отримане відхилення реального кореляційного максимуму, загасання і додавання фази, що призведе до невірної кореляції небажаного багатоприменового сигналу. Спотворені характеристики відбитого сигналу (такі як фаза і затримка) є причиною проблем, пов'язаних з відстежуванням сигналу і його місцезнаходженням.

Внаслідок численних перевідображень до одержувача може прийти не одна, а відразу декілька копій початкового сигналу. При цьому якщо одна з копій опиниться в протифазі з основним джерелом сигналу, тобто буде відставати від нього на половину періоду, то після складання двох копій сигналу в приймачі енергія основного сигналу виявиться пригніченою його ж копією. Крім того, під час передачі радіосигнал зазнає загасання. У результаті на приймальній стороні енергія сигналу може виявитися нижче порогу чутливості приймача, що призведе до пропуску сигналу або помилкового його прийому.

В результаті даної роботи в середовищі Matlab побудована наглядна модель автокореляційної функції радіонавігаційного сигналу та взаємнокореляційної функції радіонавігаційного сигналу з ефектом багатоприменовості рис.2.

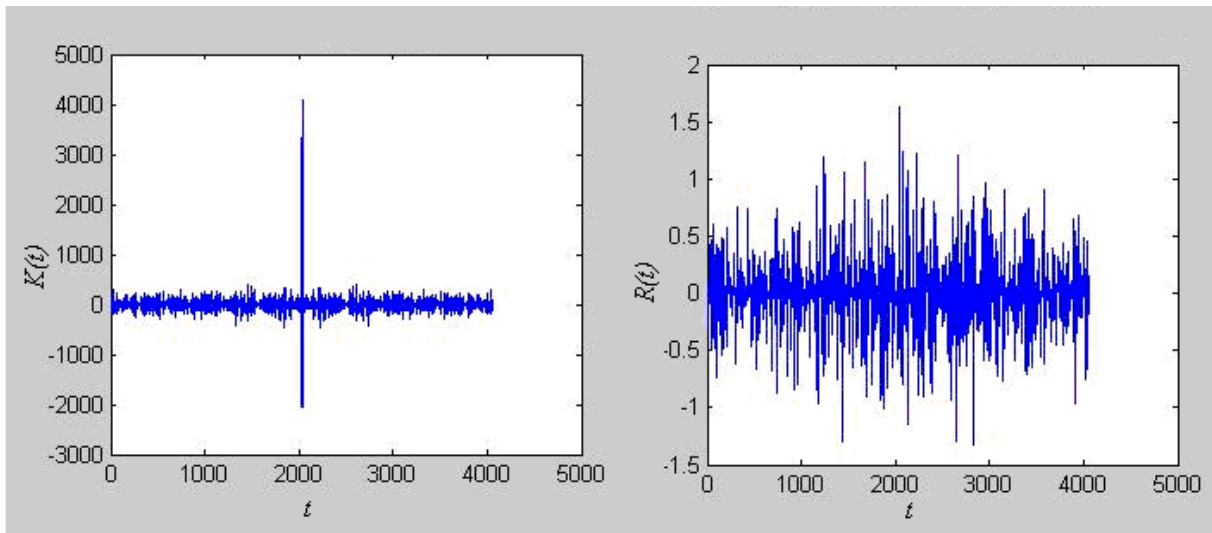


Рис.2 Автокореляційна функція сигналу та взаємнокореляційна функція сигналу з ефектом багатопроменевості

### Висновки

На приймальну антену споживача може поступати не лише прямий сигнал від навігаційного супутника, але і багато відображених сигналів від земної, морської поверхонь та різних об'єктів, що знаходяться поблизу, наприклад споруд. Для авіаційного споживача затримка відображеного сигналу може скласти 0,6–160 мкс для супутника, що знаходиться у зеніті; при невеликих кутах підвищення супутника це значення зменшується на порядок.

Рівень відображеного сигналу може бути сумірним з прямим сигналом. Це призводить до суттєвих спотворень корисного сигналу і до похибок в схемах стеження за параметрами цього сигналу (затримкою, частотою і фазою). Ці похибки багато в чому залежать від взаємного розташування супутника, приймальної антени і відображуваних об'єктів. Експериментальні дослідження показали великий розмах значень далекомірної похибки через ефект багатопроменевості, яка складає 0,5–2 м в кращому випадку (при використанні спеціальних антен) і до 100 м в гіршому, в міських умовах з висотними будівлями. Використання в останній ситуації спеціальних антен і апаратних алгоритмів придушення багатопроменевості може зменшити похибку від декількох до десятків метрів.

Широке поширення глобальних навігаційних супутникових систем дозволяє говорити про зростаючу довіру до цієї технології, починаючи від звичайних людей, закінчуючи бізнесом і різними організаціями. Сьогодні ця технологія застосовується не лише у сфері персональної навігації і безпеки, але також дозволяє отримувати значну комерційну вигоду. Таким чином, розробникам, виробникам і споживачам цих продуктів необхідно розуміти, які переваги мають такі системи, а також з якими обмеженнями і проблемами вони можуть зіткнутися при їх використанні.

### Список літературних джерел

1. Мазурков М.И. Системы широкополосной радиосвязи: учеб. Пособие для студ. вузов. – О.: Наука и техника, 2010. – 340 с.
2. Прокис Джон. Цифровая связь: Пер с англ. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Харисова В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. – М.: ИПРЖ, 1998. - 400 с.
4. Garin L., Van Diggelen F. and Rousseau J.M. Strobe & Edge correlator multipath mitigation for code. Proc. of ION GPS-96, The Institute of Navigation, Alexandria, VA, 1996, pp. 657-664.
5. Veitsel V., Zhdanov A., Zhodzishsky M. The mitigation of multipath errors by strobe correlators in GPS/GLONASS receivers. GPS Solutions, Volume 2, Number 2, Fall 1998, pp. 38-45.
6. Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the Global Positioning System [John A. Volpe, NTSC, Aug 29th, 2001].