

УДК 621.391.23

О.А. Моргун

ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРОПОСФЕРНОГО ШАРУ НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

*В статті наведені данні про експериментальні дослідження впливу тропосферного шару на розповсюдження радіохвиль міліметрового діапазону*

**Ключові слова:** тропосферний шар, завадостійкість, розповсюдження радіохвиль.

### Вступ

У Загальнодержавній науково-технічній космічній програмі на 2008-2012 рр. розглядаються основні питання розвитку космічних систем, у тому числі космічних систем спостереження для вирішення завдань дистанційного зондування Землі. Проблемні питання застосування низькоорбітальних космічних апаратів спостереження (КА) настійно вимагають вдосконалення пристроїв та засобів в радіолініях управління космічними апаратами. При цьому тенденцію збільшення швидкості і об'єму передавання інформації з одночасним зменшенням ширини діаграми направленості радіотехнічних засобів може забезпечити використання надвисокошвидкісного (НВЧ) діапазону. Індустріальний розвиток суспільства потребує переходу на високошвидкісні радіоканали передавання інформації. На ефективність роботи приймальних пристроїв в радіолініях управління радіотехнічних комплексів (РТК), що працюють у НВЧ діапазоні, негативно впливають частотно-селективні замирання (ЧСЗ) радіосигналів в атмосфері Землі, а також внутрішні (теплові) шуми. Внаслідок цього виникають нелінійні спотворення інформаційних сигналів, що приводять до зменшення динамічного діапазону і зниження завадостійкості приймальних пристроїв. При цьому особливе значення має створення і застосування надто високочастотних радіотехнічних комплексів.

Дослідженню питань завадостійкості, а також створенню адаптивних до завадової обстановки приймальних пристроїв присвячено багато робіт. Аналіз літературних джерел і сучасних космічних систем показав, що для боротьби з замираннями і нелінійними спотвореннями радіосигналів застосовуються методи зменшення швидкості потоку інформації або динамічної зміни величини потужності передавальних пристроїв в залежності від величини замирань на трасі розповсюдження. Крім того, через вплив атмосферного (зокрема тропосферного) шару на розповсюдження міліметрових радіохвиль завадостійкість таких РТК значно знижується.

Вказані методи, враховуючи однопунктну технологію управління космічними апаратами та обме-

женість енергетичного запасу радіотехнічних засобів наземного комплексу управління, не є оптимальними для реалізації в Україні космічних систем.

**Аналіз літератури.** У працях [1 – 3] проведені теоретичні дослідження впливу радіофізичних процесів на радіосигнали міліметрового діапазону. Для урахування специфічних прояв цих процесів потрібно проведення практичних експериментів у НВЧ радіоканалах. Таким чином, підвищення завадостійкості приймальних пристроїв в радіолініях управління космічними апаратами є однією з важливих умов подальшого розвитку космічних систем дистанційного зондування. Тому можна обґрунтовано стверджувати про наявність актуальної наукової задачі дослідження – розробка методу підвищення завадостійкості приймальних пристроїв НВЧ діапазону в радіолініях управління космічними апаратами.

Тому основною метою статті є обговорення основних результатів експериментальних радіофізичних досліджень, щодо ефектів розповсюдження міліметрових хвиль.

### Викладення основного матеріалу

Найбільш важливою задачею є проведення комплексних вимірювань фазових характеристик ширококутових тропосферних радіоліній міліметрового діапазону хвиль в різних типових метеоумовах. Для практичного вирішення цієї задачі була створена дослідна ширококутова горизонтальна радіолінія зі смугою частот 1 ГГц і центральною частотою  $f_0 = 37$  ГГц.

На приймальному і передавальному терміналах радіолінії використовувались ідентичні антени Кассегрена з діаметром головного дзеркала 1,1 м; спектр зондуемого сигналу містив три дискретні складові, які були отримані шляхом амплітудної модуляції несучого коливання передавача монохроматичним сигналом з частотою 500 МГц (ця модуляція здійснювалась шляхом зміни напруги живлення генератора на діоді ганна, на якому реалізований передавач з середньою потужністю 70 мВт); приймач створений по супергетеродинній схемі з неохолоджуванним змішувачем на діоді з бар'єром

Шотки на вході. Коефіцієнт шуму приймача складає 9 дБ, фільтрація спектральних складових вхідного сигналу здійснювалась за допомогою схеми АПЧ. Таким чином, енергетичний потенціал радіолінії, яка досліджувалась, дозволяв забезпечити співвідношення сигнал – шум близько 50 дБ, це гарантувало високоточне вимірювання фазових спотворень  $\Delta\varphi$  зондуючих сигналів у експериментальному НВЧ – радіоканалі, причому значення  $\Delta\varphi$  кількісно оцінювалось шляхом роздільного перемноження центральної частоти передавача з кожним з бокових коливань і обчисленням потім величини  $\Delta\varphi$  за формулою

$$\Delta\varphi = 2\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_3, \quad (1)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – приращення фаз, які отримані відповідно нижньою боковою, центральною і верхньою боковою спектральними складовими зондуючого сигналу при їх розповсюдженні радіолінії.

Для підвищення достовірності результатів вимірювання періодично (з інтервалом в одну годину) здійснювалась калібрування приймальної апаратури по тестовому сигналу імітатора з апіорно відомими параметрами і ідентично зондуючому сигналу спектральним складом, який територіально розміщувався на приймальному терміналі радіолінії. Таким чином забезпечувалась сумарна апаратурна погрішність зміни фази порядку  $0,6^\circ$  і методична помилка біля  $0,4^\circ$ .

Експерименти забезпечувались метеоданими, щодо нижнього прикордонного шару атмосфери. Аналіз графіків експериментальних результатів дозволяє зробити висновок про те, що у відсутність гідрометеорів значення величини повільно флюктує в околиці нульового значення з відхиленням звично не більш  $\pm 4^\circ$ . Випадання гідрометеорів приводить до зростання  $\Delta\varphi$  від  $-15 \div -40^\circ$  до  $+35 \div +40^\circ$ , при чому початок зростання співпадає, як правило, з початком дощу, але після його закінчення дисперсія фази може залишитись значною досить довго (особливо в випадках теплої підстелаючої поверхні та достатньо високої температури повітря). Для забезпечення можливості об'єктивного порівняння і статистичної обробки опитних даних сопоставлення останніх проводилось на основі використання інтегральної інтенсивності дощу, яка відповідає дощу з однаковим (з реальним дощем) спільним послабленням й рівномірною вдовж усієї траси розповсюдження радіохвиль інтенсивністю [5]

$$A = \text{Ral}^b \Big|_{\lambda=8\text{mm}} \cong 0,25KI, \quad (2)$$

де  $A$  – послаблення (приймається рівним нулю);

$R$  – довжина траси (км);

$I$  – інтенсивність дощу (мм/г);

$a, b$  – коефіцієнти, які залежать від частоти

сигналу, температури навколишньої середовищі і розподілення капель по розмірам.

Як вже помічалось, одна з основних обставин переведа засобів зв'язку в міліметровий діапазон довжини хвиль – можливість почутного поширення смуги частот НВЧ-радіолінії, а тому, і відповідного збільшення швидкості передачі інформації [2]. Однак, реальні перспективи практичної реалізації вказаної можливості обмежені рядом принципових і технічних факторів, в частості – кінцевої ширини смуги когерентності турбулентної дисперсійної тропосфери (особливо при багатопроміннево розповсюдженні радіохвиль, що правда може мати місце, як правило, лише у випадку достатньо малих кутів місця) [3]. В той час треба враховувати, що при цифровій передачі повідомлень ширина смуги частот каналу зв'язку може помітно привишувати смугу когерентності використовуємої ОВЧ радіолінії, так як для високоякісного прийому дискретних сигналів суттєво лише виконання умов селективності Найквіста (що у ряді випадків справедливо і при значних спотвореннях інформаційних символів) [5]. Цьому для деяких зв'язних додатків більш зручніші дисперсійні якості ОВЧ радіоліній характеризувати часовими параметрами і ефективною довжиною  $T_{\text{эф}}$  імпульсного сигналу  $S(t)$  [2, 4]

$$T_{\text{эф}}^2 \equiv \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - t_0)^2 S^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt} = \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2\pi E_S} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} G'(\omega)^2 d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \Theta'(\omega)^2 d\omega \right\},$$

де  $t_0$  – середня затримка сигналу  $S(t)$ , при цьому

$$t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t S^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt}. \quad (4)$$

де  $E_S$  – енергія сигналу  $S(t)$ ,

$$E_S = \int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt; \quad (5)$$

$G(\omega), \Theta(\omega)$  – амплітудна та фазова частини спектра  $S(j\omega)$  сигналу  $S(t)$ , тобто

$$S(j\omega) = G(\omega)e^{j\Theta(\omega)}. \quad (6)$$

Риска ( $'$ ) означає похідна по частоті.

Визначав таким чином зростання значення  $T_{\text{эф}}$  в порівнянні з вихідною довжиною тактового інтервалу, можливо визначити зростання рівня й глибини міжсимвольних спотворень дискретних сигналів, а

потім знайти степінь впливу дисперсійних особливостей НВЧ-радіолінії на якість передачі цифрової інформації [1].

Оцінімо вплив виявленої в ході експериментів (див. вище) аномальної дисперсії фази на якість когерентної передачі дискретних сигналів з фазовою маніпуляцією. Не враховуючи при цьому ефекти “розмиття” енергії сигналів у часі (формули (1) – (7)), відмітимо, що фазові спотворення модульованих коливань можуть приводити до зміщення оцінок інформаційних параметрів в наслідок помилок  $\delta\varphi$  когерентного відновлення несучої

$$\delta\varphi = \frac{1}{\Delta f} \int_{-\frac{\Delta f}{2}}^{\frac{\Delta f}{2}} \varphi(f) df, \quad (7)$$

де  $\varphi(f)$  – фазово-частотна характеристика використовуваного каналу зв’язку.

Припускається, що зміна рівня сигналу на виході приймача простежується і вплив цих варіацій усувається відомими методами [4].

Розрахунки показують, що вказані значення дисперсії фази  $|\Delta\varphi| = 40 \div 60^\circ$  тропосферних КВЧ радіоканалів при когерентному прийомі інформаційних сигналів можуть приводити до втрат завадостійкості від 2 – 4 дБ для ВФМ – 2 до 3,5 – 5 дБ для ВФМ – 4 в залежності від виду ФЧХ  $\varphi(f)$  використовуваної радіолінії.

У зв’язку з цим при появі частотно-селективних фазових спотворень на трасі розповсюдження радіохвиль представляє доцільним переходити на автокореляційний метод прийому ВФМ сигналів, тобто у випадку наявності тропосферної ділянки міліметрової радіолінії найбільш переважний адаптивний варіант організації НВЧ каналу високошвидкісної передачі цифрової інформації. Враховуючи при цьому втрати автокореляційного метода прийому ВФМ сигналів зрівнюючи з когерентною обробкою останніх [5], отримуємо остаточно, що адаптивне високочастотна тропосферного НВЧ радіозв’язку

турбулентному середовищі розповсюдження міліметрових хвиль забезпечує виграш 0,9 – 1 дБ для ВФМ – 2 і 1,5 – 1,7 дБ для ВФМ – 4 (зрівнюючи з когерентною детермінованою системою аналогічного призначення). Інтерес представляє також дослідження реальних можливостей практичного прогнозування і високоточного прогнозу виміру знака і величини дисперсії фази з метою введення відповідних поправок в схему відновлення несучої когерентного приймача модульованих сигналів для підвищення завадостійкості передачі інформаційності останніх.

## Висновок

В цілому, проведений аналіз показує важливість обліку специфіки тропосферного розповсюдження широкопasmових КВЧ радіосигналів для дослідження і розробки ефективних систем з високим ступенем завадостійкості, а також свідчить про актуальність і практичну необхідність проведення подальшого ціленаправленого теоретичного і експериментального частотно-селективних явищ в атмосферних радіолініях міліметрового діапазону довжини хвиль.

## Список літератури

1. Ипполито Л.Дж. Влияние условий атмосферного распространения радиоволн на космические системы / Л.Дж. Ипполито // *Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике.* – 1981. – Т. 69, №6. – С. 29-58.
2. Радиосистемы передачи информации // И.М. Тепляков, Б.В. Роцин, А.И. Фомин, В.А. Вейцель. – М., 1982. – 264 с.
3. Крейн Р.К. Прогноз влияния осадков на спутниковые системы связи / Р.К. Крейн // *Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике.* – 1977. – Т. 65, №3. – С. 210-231.
4. Кисель В.А. Аналоговые и цифровые корректоры: справ. / В.А. Кисель. – М., 1986. – 184 с.
5. Окунев Ю.Б. Теория фазоразностной модуляции / Окунев Ю.Б. – М., 1979. – 240 с.

Надійшла до редколегії 10.08.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, ДП «Центральний НДІ навігації і управління», Київ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТРОПОСФЕРНОГО СЛОЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А.А. Моргун

*В статье приведены данные об экспериментальных исследованиях влияния тропосферного слоя на распространение радиоволн миллиметрового диапазона*

**Ключевые слова:** тропосферный слой, помехоустойчивость, распространение радиоволн.

## EXPERIMENTAL RESEARCHES OF INFLUENCE OF TROPOSPHERE LAYER ON DISTRIBUTION OF RADIO WAVES OF MILLIMETRIC RANGE

А.А. Morgun

*In the article the influences of troposphere layer given about experimental researches are resulted on distribution of radio waves of millimetric range*

**Keywords:** troposphere layer, antijammingness, distribution of radio waves.