

АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 621.396.946

¹В.П. Харченко, д.т.н., проф.
²Ю.М. Барабанов, к.т.н., доц.
³А.М. Грехов, д.ф.-м.н., проф.

МОДЕЛЮВАННЯ СУПУТНИКОВОГО АВІАЦІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: kharch@nau.edu.ua²E-mail: brbnv@i.ua³E-mail: grekhovam@ukr.net

Із використанням програмного комплексу MATLAB Simulink побудовано модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція», яка дозволяє досліджувати залежності коефіцієнта двійкових помилок від типу модуляції сигналу, швидкості передачі інформації, потужності сигналу, діаметра антен та нелінійності підсилювача високої потужності. Ці залежності вперше були порівняні з аналогічними залежностями, отриманими за допомогою програмного комплексу «Альбатрос-Бюджет» для геостаціонарного супутника.

Ключові слова: діаметр антен, коефіцієнт двійкових помилок (BER), модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція», нелінійність підсилювача високої потужності, потужність сигналу, супутниковий канал зв'язку, тип модуляції сигналу, швидкість передачі інформації, MATLAB Simulink.

Постановка проблеми

Авіаційний електрозв'язок є галуззю, що динамічно розвивається з урахуванням еволюції характеристик і принципів побудови зв'язку супутникових систем із літальними апаратами [1–5].

Застосування супутникового зв'язку в авіації пов'язано з такими чинниками [1; 6]:

- із можливістю обслуговування великої кількості літаків незалежно від відстані;
- незалежністю витрат при організації зв'язку від відстані між літаками;
- незначним впливом атмосфери та місць розташування наземних станцій на надійність зв'язку.

Принцип дії систем авіаційного супутникового зв'язку заснований на використанні супутникових ретрансляторів, через які здійснюється зв'язок між літаком та наземними станціями [1; 6; 7].

Питання, пов'язані з роботою супутникового авіаційного каналу зв'язку, є дуже важливими. Навіть невелика деградація параметрів каналу зв'язку впливає на швидкість передачі даних або зону покриття системи, що

відразу позначається на безпеці польотів і експлуатаційних витратах. Важливо знати, яким чином можна постійно підтримувати параметри каналу зв'язку оптимальними.

Актуальною є розробка моделей реальних каналів супутникового авіаційного зв'язку та дослідження за їх допомогою способів управління критичних ситуацій.

Аналіз досліджень і публікацій

Особливістю більшості систем мобільного супутникового зв'язку є маленький розмір антени терміналу, що ускладнює прийом сигналу. Для того, щоб потужність сигналу, що досягає приймача, була достатньою, супутники розташовують на геостаціонарній орбіті (система Inmarsat [1]) або на похилих та полярних орбітах (системи Iridium і Globalstar [1–5]).

При цьому необхідна потужність передавача не така висока, і вартість виведення супутника на орбіту нижче.

Однак такий підхід вимагає не тільки великої кількості супутників, але й розгалуженої мережі наземних станцій.

У праці [1] аналізуються системи супутникового зв'язку з рухомими об'єктами, у працях [2; 3] – взаємодія супутникових систем зв'язку з комп'ютерними мережами.

У праці [4] розглядаються системи радіозв'язку, у працях [5; 6] – низькоорбітальні супутникові системи зв'язку.

У праці [7] проводиться моделювання зв'язку з використанням супутникових транспондерів.

Іншою особливістю супутникових систем зв'язку є необхідність працювати в умовах порівняно низького співвідношення сигнал/шум, викликаного [1–4]:

- значною відстанню приймача від передавача;
- обмеженою потужністю передавача супутника.

Це викликає появу помилок і потребує детального теоретичного вивчення для отримання залежностей параметрів каналу зв'язку від характеристик трафіку.

Мета роботи – побудова моделі каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» з використанням програмного комплексу MATLAB Simulink, яка дозволить дослідити залежності коефіцієнта двійкових помилок (Bit Error Rate – BER) від типу модуляції сигналу, швидкості передачі інформації, потужності сигналу, діаметра антен та нелінійності підсилювача високої потужності.

Для підтвердження надійності створеної моделі отримані залежності необхідно порівняти з аналогічними залежностями, відомими з літератури [8] та отриманими за допомогою програмного комплексу «Альбатрос-Бюджет».

Структура моделі каналу зв'язку

Нова модель супутникового каналу зв'язку літака побудована в середовищі MATLAB Simulink [9] з використанням демонстраційної моделі каналу «супутник – наземна станція» з розділу Blocksets / Communications / Channel Models and Impairments / RF Satellite Link.

Модель каналу зв'язку складається з блоків, що імітують роботу самого каналу, і екранів індикаторів сигналів, відображаючих

їх зміни в процесі проходження по лінії зв'язку.

Модель супутникового каналу зв'язку літака складається з таких блоків (рис. 1):

- бортового передавача інформації (Aircraft Transmitter);
- каналу передачі інформації з борта на супутник (Uplink Path);
- супутникового повторювача (Satellite Repeater);
- каналу передачі інформації з супутника на Землю (Downlink Path);
- приймача наземної станції (Ground Station Receiver).

До бортового передавача інформації (Aircraft Transmitter) належать:

- генератор випадкових чисел (Random Integer Generator);
- квадратурний модулятор для основної смуги частот (Rectangular QAM Modulator Baseband);
- фільтр передавача з характеристикою типу «піднятий косинус» (Raised Cosine Transmit Filter);
- підсилювач високої потужності з нелінійностями без ефектів пам'яті (High Power Amplifier, Memoryless Nonlinearity);
- антенний підсилювач (Tx. Dish Antenna Gain).

Канал передачі інформації з борта на супутник (Uplink Path) та канал передачі інформації з супутника на Землю (Downlink Path) фіксують:

- втрати у вільному космічному просторі (Free Space Path Loss);
- зсув фази/частоти (Phase/Frequency Offset, Doppler and Phase Error).

Супутниковий повторювач (Satellite Repeater) підсилює та дзеркально відбиває сигнал з літака.

Приймач наземної станції (Ground Station Receiver) відслідковує:

- теплові шуми приймача (Receiver Thermal Noise);
- роботу антенного підсилювача приймача (Rx. Dish Antenna Gain);

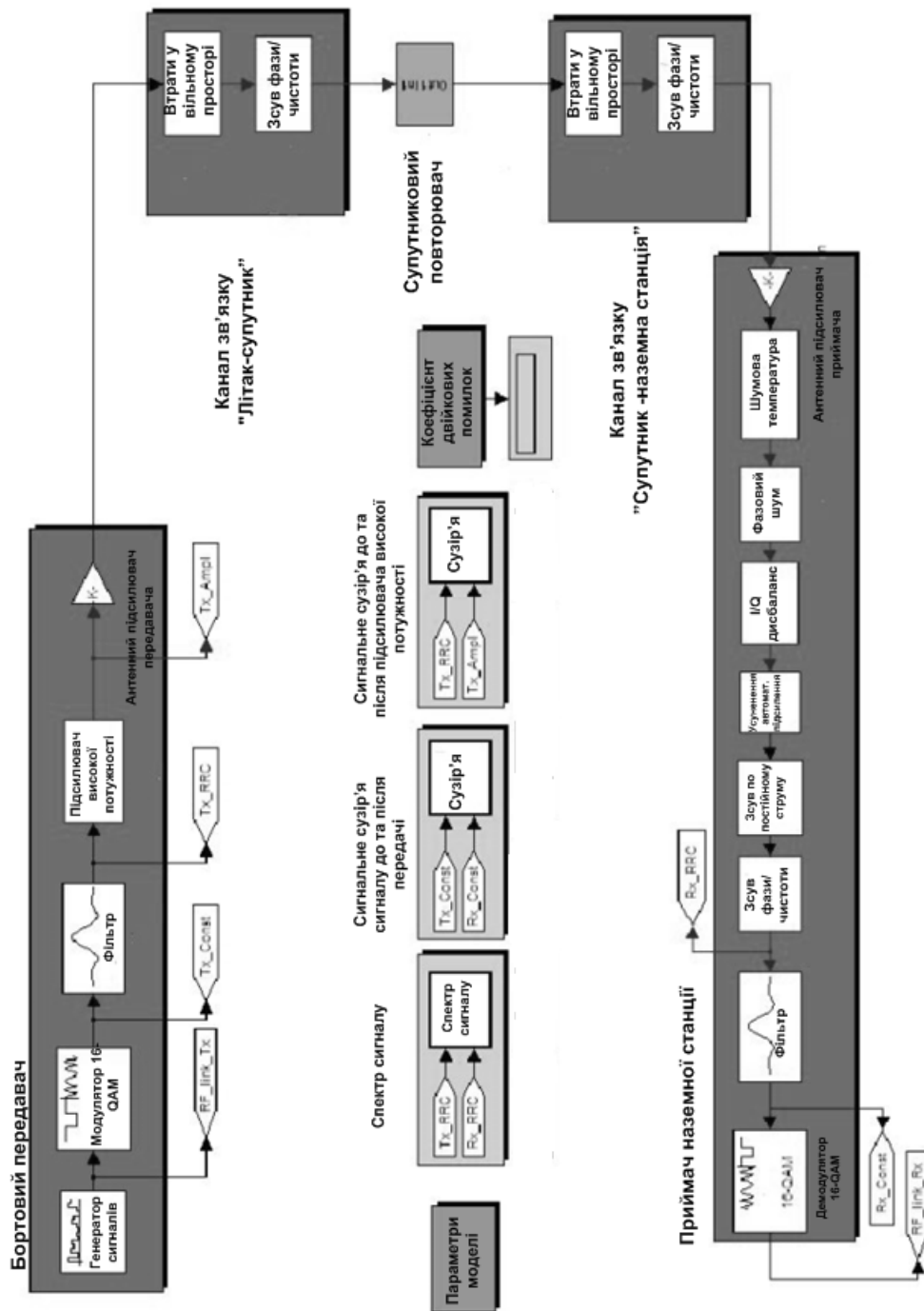


Рис. 1. Модель супутникового каналу зв'язку літака (MATLAB Simulink)

- фазовий шум (Phase Noise);
- випадкові перекручування фази;
- дисбаланс I/Q (I/Q Imbalance);
- зсув за постійним струмом (DC Removal);
- автоматичне регулювання підсилення для компонентів I та Q (Select AGC - Automatic Gain Control);
- компенсацію зсуву фази/частоти (Doppler and Phase Compensation);
- роботу фільтра приймача з характеристикою типу «піднятий косинус» (Raised Cosine Receive Filter);
- роботу квадратурного демодулятора для основної смуги частот (Rectangular QAM Demodulator Baseband).

У ході моделювання роботи каналу використовувалися такі засоби аналізу результатів моделювання, як вікна-індикатори, які можна зробити активними та аналізувати з їх допомогою зміни сигналу.

Частота появи помилкових бітів BER дисплей показує:

- кількість переданих символів;
- кількість помилок;
- частоту появи помилкових бітів.

Обчислення BER обновляється через кожні 5000 символів і дозволяє аналізувати вплив змін у моделі без перезапуску моделі.

Спектр сигналу дозволяє вивчати спектр модульованого/фільтрованого переданого сигналу (синій) і прийнятого сигналу (червоний) перед демодуляцією (рис. 2).

Якщо обидва спектри ідентичні, то на дисплей виводиться один спектр зеленого кольору.

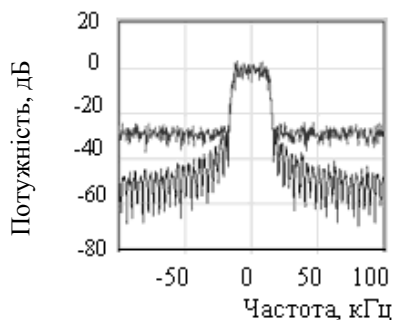
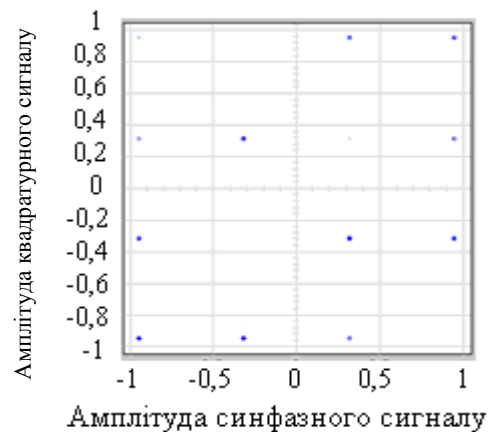


Рис. 2. Спектри переданого і прийнятого сигналів

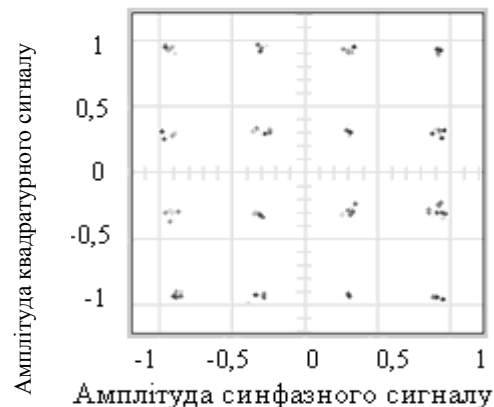
Порівняння цих спектрів дозволяє вивчати вплив таких факторів:

- зміну спектра, зумовлену нелінійностями підсилювача високої потужності;
- тепловий шум приймача;
- флікерний фазовий шум.

Сигнальні сузір'я переданого і прийнятого сигналів дозволяють порівнювати діаграми сигналів після модуляції та перед демодуляцією, вивчаючи вплив всіх факторів на прийнятий сигнал (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Сигнальні сузір'я переданого (а) та прийнятого сигналів (б)

Сигнальні сузір'я до і після підсилювача високої потужності дозволяють порівнювати діаграми сигналу до і після підсилювача високої потужності, вивчаючи вплив нелінійності підсилювача на сигнал.

Комп'ютерні експерименти проводилися з використанням створеної моделі для вивчення втрат у каналі зв'язку. Для цього змінювалися:

– шумова температура від 290 К (типовий рівень шуму) до 20 К (дуже низький рівень шуму);

– висота супутника і робоча частота, які впливають на втрати у вільному космічному просторі;

– діаметри передавальної і приймаючої антен, що збільшувало або зменшувало потужність прийнятого сигналу.

При цьому аналізувалися зміни в прийнятому сигнальному сузір'ї й зміни в спектрі прийнятого сигналу.

Програмний комплекс «Альбатрос-Бюджет» [8] призначений для розрахунку енергетичних характеристик лінії супутникового зв'язку між двома наземними станціями через космічну станцію на геостаціонарній орбіті (рис. 4).

У комплексі використані моделі довгострокового прогнозу втрат поширення радіохвиль, засновані на рекомендаціях ITU-R, адекватні моделі орбітального руху та ретрансляції сигналів.

Комплекс забезпечує розрахунок співвідношення сигнал/шум на лінії і багатьох допоміжних параметрів (визначення кутів орієнтації антен на супутник, розрахунок зон видимості та обслуговування та ін.).

Результати моделювання

Дослідження залежності коефіцієнта двійкових помилок BER від типу модуляції сигналу та швидкості передачі проводилося за допомогою програмних комплексів MATLAB Simulink і «Альбатрос-Бюджет» для швидкостей передачі даних 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 кбіт/с і типів модуляції BPSK, QPSK, PSK8, 16QAM за сумарних втрат у вільному просторі 196 дБ.

Постійна потужність передавача й підтримка співвідношення E_b/N_0 досягалися підбором взаємного розташування центральної наземної станції, супутника та периферійної земної станції.

Зміна швидкості передачі в комплексі MATLAB Simulink моделювалася зміною частоти вибірки (параметра Sample Time) при розмірі фрейму (параметр Frame Size), що дорівнює одиниці.

Результати розрахунків показали, що коефіцієнт BER у випадку обох програмних комплексів не залежить ні від типу модуляції сигналу, ні від швидкості передачі інформації.

Для можливості порівняння результатів тут і в подальшому висота супутника дорівнює 35 600 км, частота приймального каналу – 4000 МГц, а частота передавального каналу – 6000 МГц, відстань від літака до супутника – 35 600 км.

Залежність коефіцієнта BER від потужності сигналу досліджувалася за допомогою програмних комплексів MATLAB Simulink і «Альбатрос-Бюджет» за швидкості передачі даних 64 кбіт/с для типу модуляції сигналу 16QAM за сумарних втрат у вільному просторі 250 дБ (рис. 5, 6).

Результати моделювання показали істотне зменшення коефіцієнта BER зі збільшенням потужності сигналу у випадку обох програмних комплексів.

Зокрема, збільшення потужності сигналу в два рази приводить до зменшення коефіцієнта BER на 36 % у випадку комплексу MATLAB Simulink і на 23 % у випадку комплексу «Альбатрос-Бюджет».

У процесі моделювання одночасно змінювалися діаметри передавальної і приймаючої антен (рис. 7), що збільшувало або зменшувало потужність прийнятого сигналу.

У випадку комплексу MATLAB Simulink розглянуті типи модуляції BPSK, QPSK, PSK8 за сумарних втрат у вільному просторі 196 дБ, потужності передавача 1 Вт і швидкості передачі даних 128 кбіт/с.

Результати моделювання свідчать про залежність коефіцієнта BER від типу модуляції.

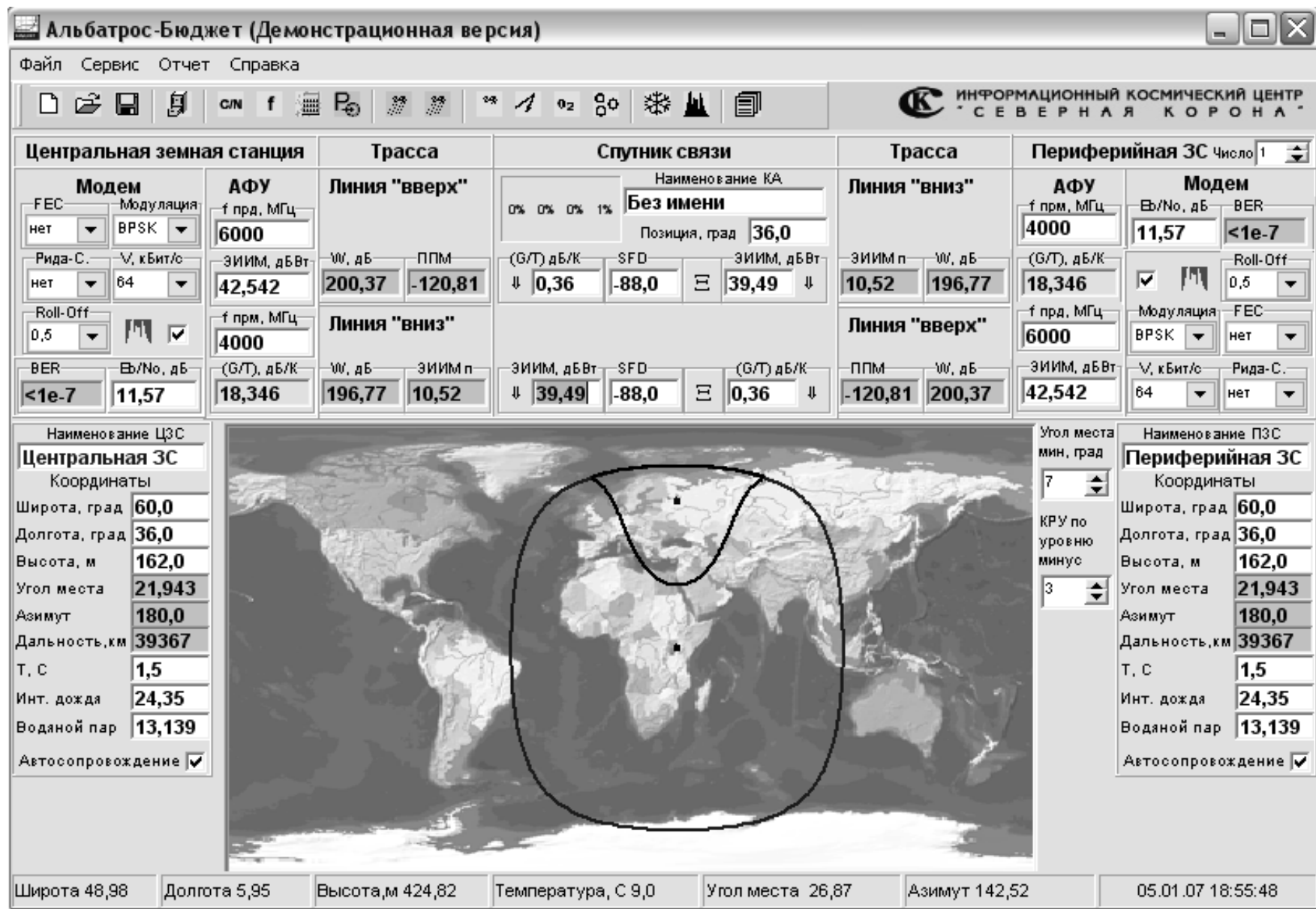


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса «Альбатрос – Бюджет»

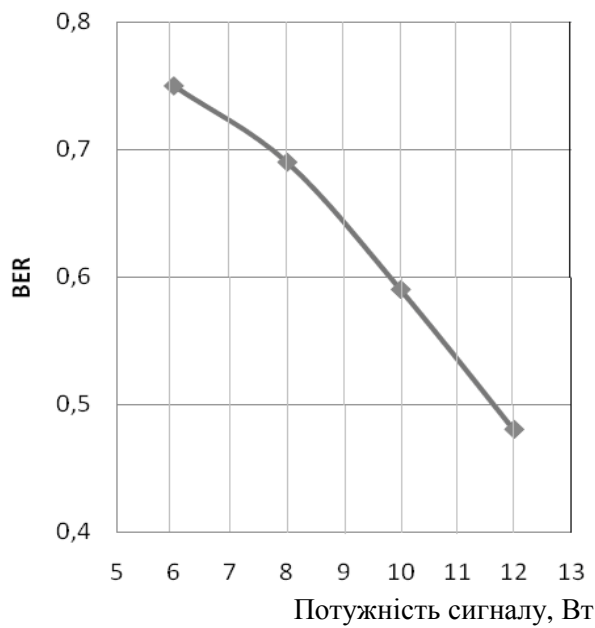


Рис. 5. Залежність коефіцієнта BER від потужності сигналу (MATLAB Simulink)

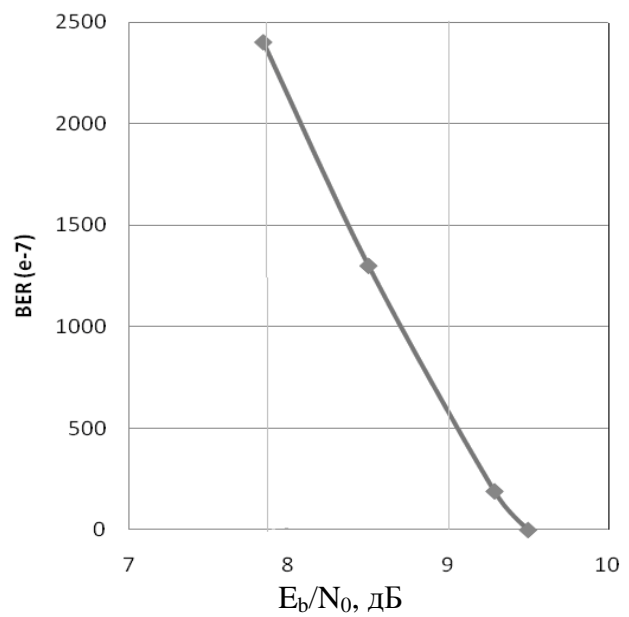
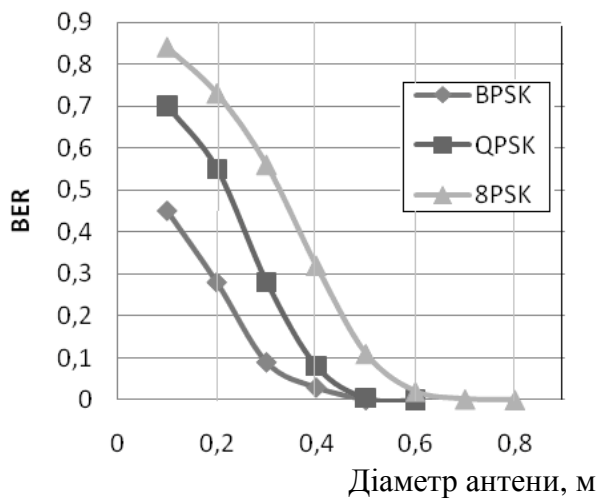
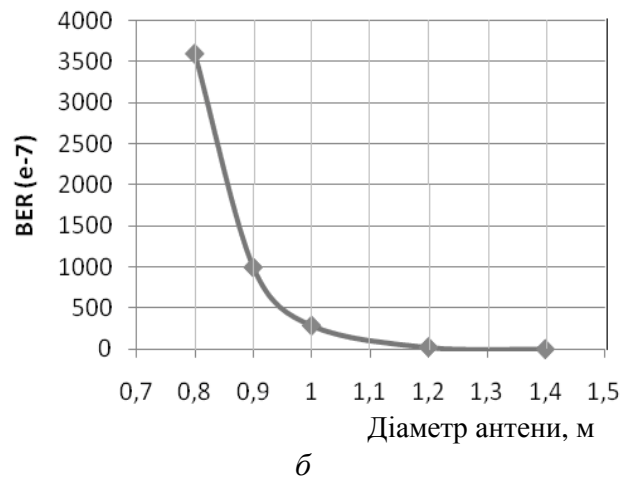


Рис. 6. Залежності коефіцієнта BER від співвідношення «сигнал-шум» («Альбатрос-Бюджет»)



а



б

Рис. 7. Залежність коефіцієнта BER від діаметра антени:
а – MATLAB Simulink;
б – «Альбатрос-Бюджет»

Аналіз зміни в прийнятому сигнальному сузір'ї та спектрі прийнятого сигналу показав, що у випадку більших змін у спектрі сигналу (більше 10 дБ) спостерігалось включення автоматичного регулювання підсилення, що приводить до осциляцій потужності прийнятого сигналу перед установленим остаточного значення.

У випадку комплексу «Альбатрос-Бюджет» також розглянуті типи модуляції BPSK, QPSK, PSK8 за сумарних втрат у вільному просторі 196 дБ і швидкості передачі даних 128 кбіт/с.

Результати моделювання свідчать про відсутність залежності в цьому випадку коефіцієнта BER від типу модуляції.

При збільшенні потужності передавача підвищується завадостійкість і пропускна здатність супутникового радіоканалу [6]. Тому важливо досліджувати залежність кількості двійкових помилок від нелінійності підсилювача за високих потужностей.

У випадку комплексу MATLAB Simulink (для швидкості передачі даних 1024 кбіт/с і типу модуляції 16QAM за сумарних втрат у вільному просторі 196 дБ) розглянуті різні рівні зниження вхідної потужності щодо потужності насичення підсилювача високої потужності (НРА Backoff Level). Цей параметр використовується для визначення того, наскільки близько супутниковий підсилювач високої потужності знаходиться до області насичення.

Установлений рівень зниження використовується для вибору посилення блоку нелінійності без запам'ятовування (Memoryless Nonlinearity Block).

Випадки слабкої, середньої та сильної нелінійностей показано на рис. 8.

При слабкій нелінійності середня вхідна потужність встановлювалася на 30 дБ нижче вхідної потужності, що викликає насичення підсилювача, тобто значення, при якому крива підсилення стає плоскою. Це спричиняє незначні AM-to-AM і AM-to-PM перекручування.

За середньої нелінійності середня вхідна потужність встановлювалася на 7 дБ нижче вхідної потужності. Це викликає середні за величиною AM-to-AM і AM-to-PM перекручування.

За сильної нелінійності середня вхідна потужність устанавлювалася на 1 дБ нижче вхідної потужності. Це викликає сильні AM-to-AM і AM-to-PM перекручування.

У випадку комплексу «Альбатрос-Бюджет» для швидкості передачі даних 1024 кбіт/с і типу модуляції 16QAM при сумарних втратах у вільному просторі 196 дБ розглянуто залежність коефіцієнта BER від коефіцієнта зниження вхідної потужності від потужності насичення (Output Back Off).

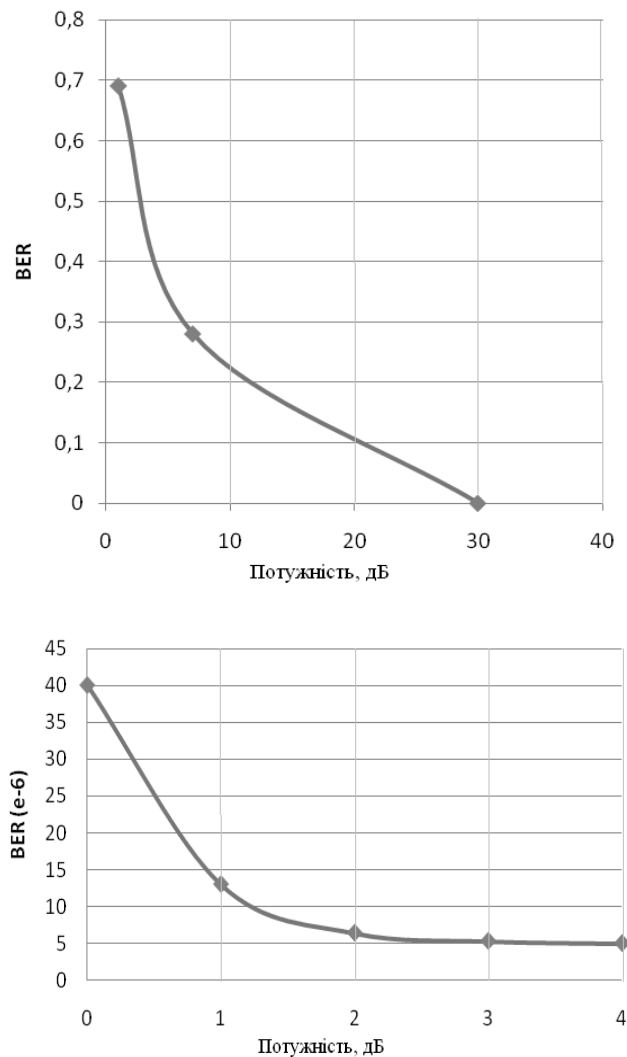


Рис. 8. Залежність коефіцієнта BER від нелінійності підсилювача високої потужності:
 а – MATLAB Simulink;
 б – «Альбатрос-Бюджет»

Висновки

1. Шляхом розширення демонстраційної моделі «RF Satellite Link» з програмного комплексу MATLAB Simulink побудовано модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція». Розширення здійснено за рахунок додавання каналу «літак – супутник» та супутникового транспондера, роль якого зведена до функцій «дзеркала» (повторювача сигналу) – підсилення та відбивання.

2. Нова модель дозволила отримати графічні залежності коефіцієнта двійкових помилок BER від типу модуляції сигналу, швидкості передачі інформації, потужності сигналу (рис. 5), діаметра антен (рис. 7, *a*) та нелінійності підсилювача високої потужності (рис. 8, *a*).

3. Згадані залежності вперше були порівняні з аналогічними залежностями, отриманими за допомогою програмного комплексу «Альбатрос-Бюджет» для геостаціонарного супутника (рис. 6, 7, *b*, 8, *b*). Порівняння показало не тільки якісне, але й непоганий числовий збіг результатів.

4. Розроблену модель можна взяти як базову для дослідження передачі ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) сигналів супутникових навігаційних систем із використанням низькоорбітального сузір'я супутників Iridium.

5. Модифікацію такої базової моделі за рахунок блоків кодування та декодування сигналів можна застосовувати для дослідження ефективності завадостійкого кодування та впливу характеристик трафіку на зменшення значення коефіцієнта BER.

Література

1. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учеб. пособ. Ч.1. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 95 с.

2. *Спутниковые системы связи и компьютерные сети*. Т. 28. Технологии электронных коммутаций / под ред. Б.Н. Виноградова, В.И. Дрожжина. – М., 1992. – 127 с.

3. *Спутниковые системы связи*. Т. 49. Технологии электронных коммутаций / под ред. А.А. Смирнова, Ю.В. Денисова. – М., 1994. – 128 с.

4. Мордуховин Л.Г. Системы радиосвязи: учебное пособие для вузов / Л.Г. Мордуховин, А.П. Степанов. – М.: Радио и связь, 1997. – 608 с.

5. Бобровский Д.Г. Низкоорбитальные спутниковые системы связи / Д.Г. Бобровский. – Сети. – 1992. – № 4. – С. 73–79.

6. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр. / Б. Склад / пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

7. Elbert, B.; Schiff, M. Simulating the Performance of Communication Links with Satellite Transponders. – Режим доступу: http://www.applicationstrategy.com/Communications_simulation.htm.

8. Комплекс «Альбатрос-Бюджет». Информационный Космический Центр «Северная Корона». – Режим доступу: <http://www.spacecenter.ru>.

9. Дьяконов В. П. MATLAB 6.0/6.1/6.5 /6.5+SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 592 с.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2011.