

УДК 621.396:621.396.933:629.783:621.396.946

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

МОДЕЛЮВАННЯ СУПУТНИКОВОГО КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ADS-B ПОВІДОМЛЕНЬ

Національний авіаційний університет

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

Побудовано модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» для моделювання передачі ADS-B повідомлень за допомогою низькоорбітального супутникового комплексу Iridium. Отримано залежності коефіцієнта двійкових помилок від типу модуляції сигналу, втрат на лінії, діаметра антен, нелінійності підсилювача високої потужності та коефіцієнта підсилення супутникового транспондера.

Ключові слова: діаметр антен, коефіцієнт двійкових помилок, модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція», MATLAB Simulink.

Постановка проблеми

Застосування супутникового зв'язку в авіації дозволяє обслуговувати літаки на великих відстанях [1–5]. Необхідність мати незначний час затримки повідомлення при проходженні через канал вимагає використання лише низькоорбітальних супутникових систем, зокрема сузір'я Iridium.

Навіть невелика зміна параметрів каналу зв'язку суттєво впливає на швидкість передачі даних або зону покриття системи. Для постійного підтримування параметрів каналу зв'язку оптимальними необхідні розробка моделей реальних каналів супутникового авіаційного зв'язку та дослідження за їх допомогою способів виправлення критичних ситуацій.

Аналіз досліджень

Робочий діапазон частот системи зв'язку Iridium становить 1616–1626,5 МГц (рис. 1). Передача інформації в L-діапазоні виконується з використанням квадратурної фазової маніпуляції (QPSK) та реалізовується через 40% квадратування при формуванні косинусоїдальних імпульсів. Різні види QPSK модуляції включають в себе диференціальне кодування (DE-QPSK) та двопозиційну фазову маніпуляцію (BPSK). Швидкість обміну даними становить 50 кбайт/с.

Мета роботи – побудова моделі каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» з параметрами системи Iridium на основі програмного комплексу MATLAB Simulink [6].

Структура моделі каналу зв'язку

Імітуючи роботу каналу зв'язку (рис. 2), модель обчислює бюджет зв'язку та визначає, чи буде передача інформації по каналу через космос можливою за заданою частотою появи помилок бітів (Bit Error Rate – BER). Передача даних, що може підтримуватися в каналі зв'язку з адитивним білим гауссовим шумом (Additive White Gaussian Noise Channel), визначається режимами роботи блоків, що моделюють підсилення і втрати, включаючи втрати у вільному космічному просторі (Free Space Path Loss Block), і блоку, що моделює теплові шуми приймача (Receiver Thermal Noise Block).

До блоків, які відповідають приймачу наземної станції (Iridium Gateway), належать:

- теплові шуми приймача (Receiver Thermal Noise);
- антенний підсилювач приймача (Rx. Dish Antenna Gain);
- фазовий шум (Phase Noise);
- дисбаланс I/Q (I/Q Imbalance);
- усунення зсуву по постійному струмі (DC Removal);
- автоматичне регулювання посилення для компонентів I та Q (AGC – Automatic Gain Control);
- компенсація зсуву фази/частоти (Doppler and Phase Compensation);
- фільтр приймача з характеристикою типу «піднятий косинус» (Raised Cosine Receive Filter);
- квадратурний демодулятор для основної смуги частот (демодулятори BPSK, QPSK, DQPSK, 8PSK, 16QAM).

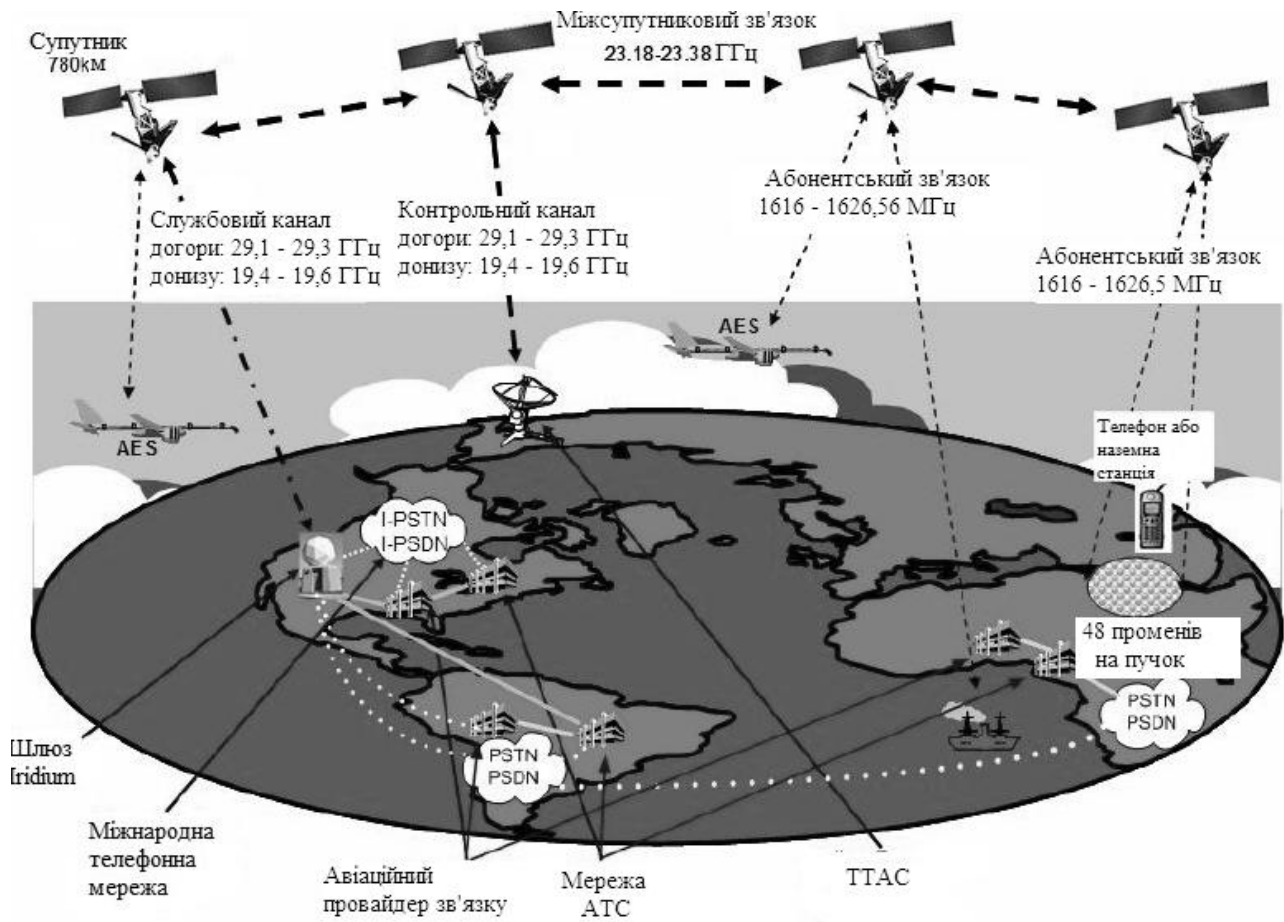


Рис. 1. Система зв'язку Iridium

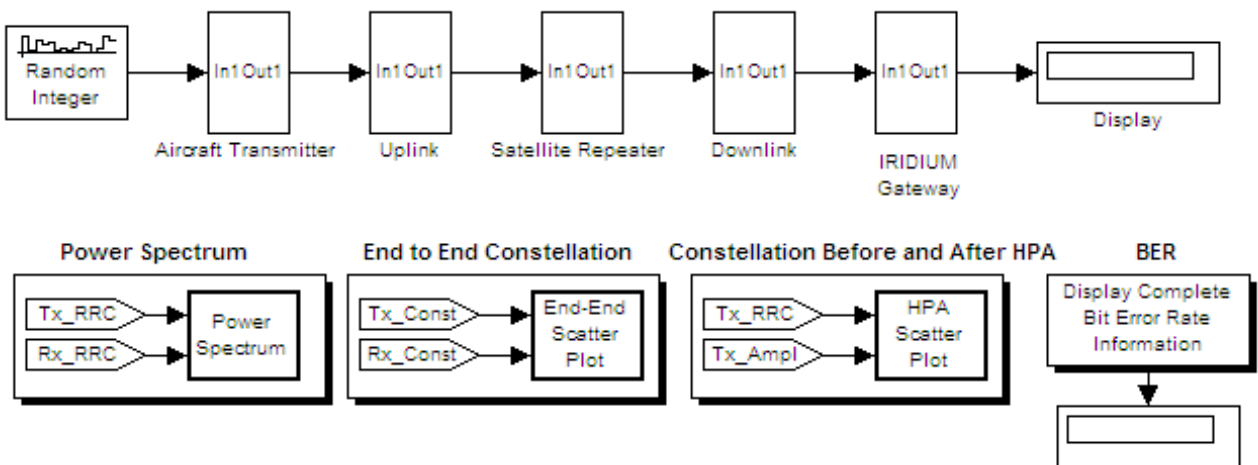


Рис. 2. Модель каналу «літак – супутник – наземна станція»

Моделювання роботи каналу зв'язку

Під час моделювання роботи каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» обиралися параметри низькоорбітального супутникового сузір'я Iridium [1]:

- висота супутника 780 км;
- робоча частота 1616 МГц;
- швидкість передачі інформації 50 кбіт/с;
- типи модуляції сигналу BPSK, QPSK.

Для порівняння було досліджено типи модуляцій DQPSK, 8PSK, 16QAM.

У ході моделювання змінювалися діаметри передавальної і приймаючої антен.

Перший елемент у векторі $[d_1, d_2]$ є діаметром передавальної антени і використовується для обчислення коефіцієнта підсилення в блоці антенного підсилювача супутникової антени передавача T.

Другий елемент є діаметром приймаючої антени і використовується для обчислення коефіцієнта підсилення в блоці антенного підсилювача супутникової антени приймача R.

Дослідження проводилися для трьох значень ефективних шумових температур приймача:

- 0 К – шум відсутній;
- 20 К – дуже низький рівень шумів;
- 290 К – типовий рівень шумів.

Рівні зниження вхідної потужності вибиралися відносно потужності насичення підсилювача високої потужності (HPA Backoff Level):

30 дБ – незначна нелінійність (середня вхідна потужність на 30 дБ нижче вхідної потужності, що викликає насичення підсилювача);

- 7 дБ – середня нелінійність;
- 1 дБ – сильна нелінійність.

Зміни сигналу аналізувалися за допомогою активних вікон-індикаторів, які дозволяли визначати:

- частоту появи помилкових бітів (Bit Error Rate (BER) Display);
- спектр сигналу та його зміну, обумовлену нелінійностями підсилювача високої потужності і тепловим шумом приймача;
- сигнальні сузір'я переданого і прийнятого сигналів, що дозволяють порівнювати точкові діаграми сигналів після модуляції і перед демодуляцією.

Для вивчення проходження сигналу в каналі зв'язку, використовуючи створену модель, змінювали:

- втрати у вільному космічному просторі симетрично в каналах «наверх» і «вниз»;
- шумову температуру наземного приймача (0, 20, 290 К);
- симетрично та асиметрично діаметри передавальної і приймальної антен, що збільшувало або зменшувало потужність прийнятого сигналу;
- коефіцієнт підсилення супутникового транспондера.

При цьому аналізували зміни в прийнятому сигнальному сузір'ї, в спектрі прийнятого сигналу та визначали значення коефіцієнта двійкових помилок BER.

При значенні шумової температури наземного приймача 0 К та відсутності підсилення сигналу супутниковим транспондером значення коефіцієнта BER дорівнювало нулю для всіх типів модуляції та всіх розглянутих розмірів антен.

Значення коефіцієнта BER також дорівнювало нулю при зміні втрат у вільному просторі в діапазоні від 0 до 100 дБ при відсутності підсилення сигналу супутником. Тому спочатку було проведено дослідження залежності коефіцієнта BER від шумової температури наземного приймача для втрат у вільному просторі 120 дБ в обох каналах – «наверх» і «вниз» – при симетричній зміні діаметрів антен. Швидкість передачі інформації становила 50 кбіт/с, нелінійність підсилювача високої потужності передавача 30 дБ (незначна нелінійність), коефіцієнт підсилення супутникового транспондера дорівнював нулю, висота супутника 780 км, частота 1616 МГц (табл. 1).

Для низькоорбітальних супутників це є реальні можливі втрати [2–5], які для геостационарних супутників можуть досягати 200 дБ.

Далі при втратах у вільному просторі 120 дБ в обох каналах, шумовій температурі приймача 290 К і відсутності підсилення сигналу супутником таких значень визначали діаметри антен, при яких канал зв'язку буде відкритим для різних типів модуляції (табл. 2).

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта BER від шумової температури наземного приймача та типу модуляції сигналу

Діаметри антен, м	Шумова температура для типу модуляції сигналу, К									
	BPSK		QPSK		DQPSK		8PSK		16QAM	
	20	290	20	290	20	290	20	290	20	290
[0.1,0.1]	0.21	0.41	0.48	0.69	0.65	0.74	0.71	0.83	0.91	0.93
[0.2,0.2]	8.1e-4	0.20	0.021	0.47	0.079	0.63	0.22	0.70	0.59	0.89
[0.3,0.3]	0.0	0.026	0.0	0.17	0.0	0.31	0.0048	0.45	0.061	0.81
[0.4,0.4]	0.0	2.1e-4	0.0	0.014	0.0	0.074	0.0	0.19	0.0	0.57
[0.5,0.5]	0.0	0.0	0.0	1.1e-4	0.0	4.5e-3	0.0	0.043	0.0	0.22
[0.6,0.6]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6e-3	0.0	0.045
[0.7,0.7]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5e-3
[0.8,0.8]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
[0.9,0.9]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примітка. У квадратних дужках перше значення – діаметр антени на літаку, друге – діаметр антени наземної станції.

Як видно з табл. 1, «чутливість» коефіцієнта BER до збільшення шумової температури приймача залежить від діаметра антени і типу модуляції сигналу. Так, чим більший діаметр антени, тим на менше значення збільшується коефіцієнт BER для кожного з розглянутих типів модуляції сигналу при збільшенні шумової температури. Крім того, в ряду модуляцій BPSK, QPSK, DQPSK, 8PSK, 16QAM спостерігається зменшення «чутливості» коефіцієнта BER до збільшення шумової температури приймача.

Дані для бортових антен літаків діаметром від 0,1 до 0,4 м і відповідних наземних антен для різних типів модуляції, за яких коефіцієнт BER дорівнює нулю, тобто канал зв'язку «відкривається», наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Значення діаметра антени наземної станції

BPSK	QPSK	DQPSK	8PSK	16QAM
[0.1,1.8]	[0.1,2.8]	[0.1,3.4]	[0.1,5.1]	[0.1,6.5]
[0.2,0.9]	[0.2,1.4]	[0.2,1.7]	[0.2,2.5]	[0.2,3.3]
[0.3,0.6]	[0.3,0.9]	[0.3,1.2]	[0.3,1.6]	[0.3,2.1]
[0.4,0.5]	[0.4,0.7]	[0.4,0.9]	[0.4,1.2]	[0.4,1.6]

Примітка. Значення параметрів відповідають значенням табл. 1.

Наприклад, при використанні модуляції BPSK і бортової антени літака діаметром 0,1 м потрібна наземна антена діаметром не менше 1,8 м (антена з вектором [0.1,1.8] у табл. 2). У цьому випадку коефіцієнт BER буде дорівнювати нулю (канал зв'язку «літак – супутник – наземна станція» буде «відкритим») за відсутності підсилення сигналу супутником та при шумовій температурі

приймача 290 К до значень втрат у вільному просторі у 120 дБ як на лінії «наверх», так і на лінії «вниз».

Як видно з табл. 2, збільшення діаметра бортової антени літака вдвічі дозволяє зменшити діаметр наземної антени вдвічі. Збільшення діаметра бортової антени літака втричі (вчетверо) дозволяє зменшити діаметр наземної антени в три (чотири) рази. Така закономірність не залежить від типу модуляції.

Результати дослідження впливу на значення коефіцієнта BER нелінійності передавача високої потужності літака при шумовій температурі наземного приймача 290 К, відсутності підсилення сигналу супутником та значеннях втрат у вільному просторі у 120 дБ як на лінії «наверх», так і на лінії «вниз» наведено в табл. 3. У цьому випадку моделювалася робота підсилювача високої потужності з нелінійностями без ефектів пам'яті на лампі біжучої хвилі з використанням моделі Салеха [6]. Для прикладу обрано значення діаметра антени літака 0,3 м.

Згідно з табл. 2 для різних типів модуляції сигналу відповідають різні значення діаметрів наземних антен.

Із табл. 3 випливає, що при незначній нелінійності передавача літака у 30 дБ коефіцієнт BER дорівнює нулю для всіх типів модуляції. Але вже при середній нелінійності у 7 дБ робота каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» неможлива внаслідок великих значень коефіцієнта BER, які зростають у ряду модуляцій BPSK, QPSK, DQPSK, 8PSK, 16QAM на два порядки. Нелінійність передавача на порядок менше впливає на модуляцію типу DQPSK порівняно з модуляцією QPSK.

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта BER від нелінійності передавача високої потужності

Рівень нелінійності	Діаметр антени для типу модуляції сигналу, м				
	BPSK [0.3,0.6]	QPSK [0.3,0.9]	DQPSK [0.3,1.2]	8PSK [0.3,1.6]	16QAM [0.3,2.1]
1 дБ (значна нелінійність)	0.041	0.12	0.044	0.48	0.61
7 дБ (середня нелінійність)	0.0027	0.011	0.0014	0.18	0.35
30 дБ (незначна нелінійність)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примітка. Значення параметрів відповідають значенням, наведеним у табл. 1.

Розрахунки, аналогічні наведеним у табл. 3, можна виконати для довільних втрат у вільному просторі, шумової температури приймача, діаметрів антен та коефіцієнта підсилення супутникового транспондера. Це означає, що можливо передбачувати кількість помилок при передачі повідомлень через канал зв'язку «літак – супутник – наземна станція», тобто оцінювати надійність супутникового авіаційного зв'язку.

Результати дослідження впливу на значення коефіцієнта BER, коефіцієнта підсилення супутникового транспондера G для довільно обраних як приклад антенах на літаку і на Землі

діаметром 0,2 м наведено в табл. 4. Очевидним результатом є зменшення значення коефіцієнта BER при збільшенні коефіцієнта підсилення супутникового транспондера. Однак характер цього зменшення залежить від типу модуляції сигналу. Чим більш «складною» є модуляція, тим більші значення коефіцієнта підсилення потрібні для зменшення кількості помилок до необхідного рівня при передачі повідомлень. Моделювання дозволило визначити для обраних параметрів каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція», що при $G = 24$ дБ канал є відкритим для всіх типів розглянутих модуляцій.

Таблиця 4

Залежність коефіцієнта BER від коефіцієнта підсилення G супутникового транспондера

G, дБ	Тип модуляції				
	BPSK	QPSK	DQPSK	8PSK	16QAM
0	0.20	0.47	0.63	0.70	0.90
2	0.14	0.39	0.56	0.65	0.88
4	0.089	0.3	0.48	0.58	0.85
6	0.039	0.21	0.38	0.5	0.81
8	0.016	0.1	0.28	0.41	0.75
10	0.0031	0.050	0.15	0.3	0.61
12	0.00031	0.013	0.067	0.19	0.55
14	0.0	0.0016	0.021	0.1	0.41
16	0.0	0.0	0.0039	0.038	0.23
18	0.0	0.0	0.00034	0.0099	0.94
20	0.0	0.0	0.0	0.0011	0.022
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0018
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Примітка. Діаметри антен [0.2,0.2], швидкість передачі інформації 50 кбіт/с, втрати на лініях «наверх» та «вниз» 120 дБ, нелінійність підсилювача високої потужності передавача 30 дБ (незначна нелінійність), висота супутника 780 км, частота 1616 МГц.

Висновки

1. Побудовано модель каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція», яка використана для моделювання передачі ADS-B повідомлень за допомогою низькоорбітального супутникового комплексу Iridium.

2. Отримано залежності коефіцієнта BER від типу модуляції сигналу, втрат на лінії, діаметра антен, нелінійності підсилювача високої потужності та коефіцієнта підсилення супутникового транспондера для супутникової системи Iridium, які демонструють перспективність розробки нових бортових антен літаків для передачі ADS-B повідомлень з використанням супутникового сузір'я Iridium.

3. Розроблена модель може застосовуватися для визначення характеристик трафіка для каналу зв'язку «літак – супутник – наземна станція» для супутників на будь-яких орбітах, довільних робочих частотах та втратах у вільному просторі.

4. Модель може бути використана як базова для дослідження режимів зв'язку між літаками та літаком і наземними службами з використанням декількох супутників, а також для дослідження реалізації оптимальних методів завадостійкого кодування.

Література

1. *Manual For ICAO Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service Part 2-Iridium Draft V4.0*, 2007. – 77 р.

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

3. *Кантор Л.Я.* Системы персональной подвижной связи через низкоорбитальные ИСЗ / Л.Я. Кантор, И.С. Поволоцкий // Вестник связи. – 1994. – № 11. – С. 61–65.

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

5. *Коньков А.М.* Перспективы развития низкоорбитальных систем спутниковой связи / А.М. Коньков // Вестник связи. – 1994. – № 1. – С. 34–38.

6. *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 20.10.2011.