

УДК 621.39

Коновальчук Ю. С., студентка (E-mail: yuliakonovalchuk@gmail.com)**Беспалова О. Г.**, студентка (E-mail: bespalova.ksyusha@gmail.com)**Шелковніков Б. М.**, канд. техн. наук, доц. (E-mail: bshelk@gmail.com)*(Національний технічний університет України «КПІ», Інститут телекомунікаційних систем, м. Київ)*

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ НА ЧАСТОТІ 240 ГГц

Коновальчук Ю. С., Беспалова О. Г., Шелковніков Б. М. Моделювання безпроводної системи на частоті 240 ГГц. У статті представлена змодельована безпроводна система на частоті 240 ГГц. Доцільність вибору робочої частоти полягає в тому, що цей діапазон має високу пропускну здатність і низьку втрату через наявність атмосферних вікон прозорості. У склад моделі входять наступні модулі: джерело цифрової послідовності 128QAM, гетеродин 120 ГГц, перетворювачі вверх та вниз по частоті, підсилювач потужності та смугопропускний фільтр. Виконано порівняльний аналіз якісних та кількісних характеристик існуючих терагерцових систем 200-300 ГГц. Результати моделювання системи 240 ГГц лежать в межах норми та їх можна побачити у вигляді графіків.

Ключові слова: безпроводна система, терагерцовий діапазон частот, атмосферне вікно прозорості, пропускну здатність, моделювання, 240 ГГц діапазон, QAM-128 модуляція

Коновальчук Ю. С., Беспалова О. Г., Шелковніков Б. Н. Моделирование беспроводной системы на частоте 240 ГГц. В статье представлена модель беспроводной системы на частоте 240 ГГц. Целесообразность выбора рабочей частоты заключается в том, что этот диапазон имеет высокую пропускную способность и низкую потерю из-за наличия атмосферных окон прозрачности. В состав модели входят следующие модули: источник цифровой последовательности 128QAM, гетеродин 120 ГГц, преобразователи вверх и вниз по частоте, усилитель мощности и полосопропускающий фильтр. Представлен сравнительный анализ качественных и количественных характеристик существующих терагерцовых систем 200-300 ГГц. Результаты моделирования системы 240 ГГц лежат в пределах нормы и их можно увидеть в виде графиков.

Ключевые слова: беспроводная система, терагерцовый диапазон частот, атмосферное окно прозрачности, пропускная способность, моделирование, 240 ГГц диапазон, QAM-128 модуляция

1. Вступ та постановка задачі. Оскільки кількість мультимедійних послуг зростає, то і безперервно зростає потреба в передачі даних на високій швидкості. Хвилі міліметрового діапазону ідеально підходять для збільшення швидкості передачі даних в системах безпроводного зв'язку, тому що експлуатаційні абсолютні смуги частот ростуть при зростанні несучої частоти. Використання частот від 200 до 300 ГГц для безпроводної передачі даних можуть служити цікавою альтернативою вирішення проблеми недостатності смуги пропускання. Ця смуга частот добре підходить для зв'язку і передачі даних додатків через високу доступну пропускну здатність, а також низьку втрату через наявність атмосферних вікон прозорості. Системи зв'язку в цьому режимі можуть подалати швидкість передачі даних більше ніж 10 Гбіт/с. Але проблемою залишається збільшення відстані передачі без погіршення BER.

Для моделювання безпроводної системи було обрано робочу частоту 240 ГГц. Доцільність використання її полягає в тому, що вибрана частота 240 ГГц має найменше значення загасання в атмосфері.

Для досягнення необхідної пропускну спроможності і смуги пропускання, передача даних може бути покращена за допомогою більш складних методів модуляції, які поставляються разом з величезною кількістю обробки даних основної смуги частот.

2. Аналіз існуючих безпроводних цифрових систем терагерцового діапазону. Розглянемо існуючі приклади прийомо-передавальних систем в робочому діапазоні 200-300 ГГц з різною швидкістю передачі.

Система 10-Гбіт/с безпроводного зв'язку [1], що працює на несучій частоті 300 ГГц має ширину смуги 20 ГГц для передачі даних зі швидкістю 10 Гбіт/с. Передавач системи складається з 20 ГГц ASK модулятора, субгармонійного змішувача, LO ланцюг, високопропускного фільтру на частоті 270 ГГц, антени. Модуль LO складається з осцилятора з фазовим автопідстроюванням, потріювача, смуго пропускного фільтру і змішувача частот. Система може передати 2^7-1 псевдовипадкових послідовності двійкових даних без помилок

зі швидкістю до 10 Гбіт/с більш ніж на 1,2 м при використанні колімаційної лінзи, де потужність передавання 10 мкВт.

Інша система, яка представлена в [2], забезпечує швидкість передачі даних до 25 Гбіт/с. Працює в діапазоні 200...280 ГГц і несуща частота складає 240 ГГц. Канал повністю розроблен за технологією ММІС і передача може досягати 40 Гбіт/с на кілометрову відстань. Вимірювання були проведені на відстань 60 см при швидкості 25 Гбіт/с і отриманий сигнал показав хорошу продуктивність до 25 Гбіт/с і коефіцієнт бітових помилок дорівнює 5×10^{-4} . Максимальна вихідна потужність складає 7dBm. Оскільки коефіцієнт шуму в приймачі в основному залежить від першої стадії підсилювача, характеристики приймача і малoshумлящого підсилювача робить істотний вплив на продуктивність системи. У роботі пропонується використання технології НЕМТ. Ця технологія забезпечує відмінні шумові характеристики в поєднанні з високим коефіцієнтом вирашу перетворення.

У системі, що описана в [3], використовується ММІС безпровідна передача сигналу при швидкості 12.5 Гбит/с, використовуючи несущу на 220 ГГц. І приймач і передавач системи використовують однакові блоки множення частоти і етапи перетворення. Перетворення частоти здійснюється за допомогою двонаправленого резистивного змішувача і генератора локального сигналу (LO). Чотириступінчастий малoshумний підсилювач на виході приймача забезпечує 20 дБ посилення слабкого сигналу. У передавачі, так само 4-каскадний МШП використовується для посилення РЧ сигналу на змішувачі, забезпечуючи передавальну потужність до 0 дБм. Була продемонстрована передача на відстань 2 метра і був отриманий BER $3.0 \cdot 10^{-10}$. Сигнал модулюється на несучій частоті 220 ГГц, використовуючи повністю інтегрований 50 нм метаморфічний на основі НЕМТ передатчик і ММІС приймач. В майбутньому, ця технологічна платформа може забезпечити нові рішення для широкосмугових підключень останньої милі.

У роботі [4] представлена безпровідна передача сигналів телебачення DVB-S при 256-QAM модуляції на частоті 220 ГГц. Тракт радіочастоти використовує активний однокристальний передавач і отримувач у вигляді ММІС. Розробка на основі InP НЕМТ ММІС передавача та приймача дозволяє отримати швидкість передачі до 10 Гбіт/с. В цій системі розроблені передавачі та приймачі на основі виділених багатофункціональних ММІС. У системі подвоювач частоти забезпечує сигнал місцевого генератора (LO) до змішувача, який через свою біспрямованість, може діяти або як понижуючий перетворювач або як підвищувальний перетворювач частоти. У приймачі чотирьохкаскадний малoshумлящий підсилювач забезпечує 20 дБ посилення слабкого сигналу і встановлює загальний показник шуму приймача 7,3 дБ. У передавачі, так само чотирьох каскадний МШП використовується як підсилювач РЧ змішувача. Модуль передавача досягає вихідної потужності від -3.4 до 1.3 dBm між 218 і 238 ГГц, в той час як приймач показує втрати перетворення тільки 1 дБ через малoshумлящий підсилювач. Вимірний BER в когерентній передачі встановлює на відстані передачі від 1м дорівнює $1.7 \cdot 10^{-5}$ і $9.1 \cdot 10^{-4}$ для 128- і 256-QAM модуляції відповідно. Швидкість досягає 55 Мбіт/с при 256-QAM модуляції.

Результати порівняння якісних та кількісних характеристик винесено в Табл. 1.

Характеристики телекомунікаційних систем терагерцового діапазону Табл. 1

Характеристики систем:	[1]	[2]	[3]	[4]
Швидкість	10 Гбіт/с	25 Гбіт/с	12.5 Гбит/с	55 Мбіт/с
Відстань дії	2 км	1 км	0.5 км	<0.5 км
Робоча частота	300 ГГц	240 ГГц	220 ГГц	220 ГГц
Експериментальна відстань передачі	1,2 м	60 см	2 м	1м
Технологія	GaAs	ММІС	ММІС	ММІС
BER	0	$5 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-10}$	$9.1 \cdot 10^{-4}$
Модуляція	ASK	ASK	ASK	QAM

Отже проблемою все ж залишається збільшення відстані передачі без погіршення BER та інших сукупних якісних характеристик. Виходячи з результатів аналізу можна зробити висновок, що використання різних методів модуляції, різної частоти або технології дають різні вихідні результати [5]. Системи відрізняються структурою, елементною базою, технологіями виготовлення.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження зміни основних характеристик системи на вихідні результати, а також створення моделі системи з кращими характеристиками і аналіз отриманих результатів. Через те, що проблемою є досягнення кращого BER та якісних характеристик і збільшення відстані передавання інформації. Отже, для досягнення мети, необхідно вирішити наступні задачі:

- вибір робочої частоти системи;
- обґрунтування вибору необхідних модулів;
- скласти вимоги до основних частин системи;
- аналіз ключових показників та характеристик змодельованої системи.

4. Моделювання системи на частоті 240 ГГц.

Для моделювання безпроводної системи було обрано робочу частоту 240 ГГц. Доцільність використання її полягає в наступному. Коливання молекулярного кисню і молекул води викликають високе затухання хвиль близько резонансної частоти молекул. Резонансні частоти молекули води в атмосфері Землі розташовані в 182 і 325 GHz. Смуга частоти безпроводного зв'язку на 240 ГГц з шириною смуги 60 ГГц розташована в атмосферному вікні між цими двома резонансними частотами і гранична частота зі значеннями загасання між 2,7 дБ/км на 213 ГГц і 4,54 дБ/км на 280 ГГц. Тому вибрана частота 240 ГГц має найменше значення загасання в атмосфері.

На відміну від моделі в роботі [6], для створення системи на частоті 240 ГГц були використані модулі приймача та передавача по технології ММІС. Кожен модуль може бути вироблений на окремому чіпі.

До складу змодельованої системи входять наступні блоки: локальний осцилятор, два змішувачі, підсилювачі, смугопропускний фільтр та приймач (Рис.1).

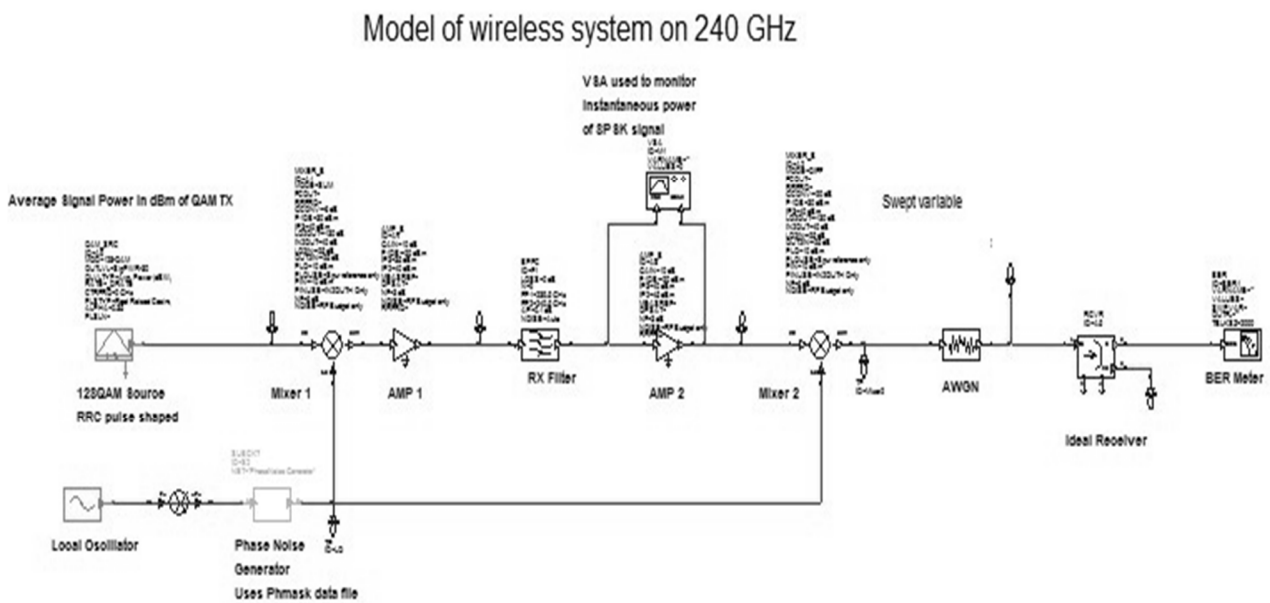


Рис. 1. Модель безпроводної системи

На вхід РЧ змішувача на передавальній стороні поступає QAM сигнал з послідовністю псевдовипадкових біт. Сигнал промодельований 128 QAM модуляцією. На LO вхід змішувача поступає сигнал LO 120 ГГц, що далі пройшов через подвоювач та генератор фазового шуму. Наявність фазового шуму в підсхемі використовується для додавання фазового шуму в 28GHz тоном.

Змішувач в схемі реалізує модель поведінки нелінійного двобалансного змішувача. Інтермодуляційні спотворення автоматично розраховуються з використанням основних рівнянь. Гармонійні спотворення задані явно. Втрати перетворення -6 дБ. Точка стиснення 1дБ змішувача дорівнює 30 дБм.

Точка інтермодуляції третього порядку знаходиться на рівні 40 дБм. Відношення вхідного сигналу до шуму на виході дорівнює 6 дБ. Шум моделюється як тепловий шум на виході. Далі вихідний сигнал поступає на нелінійний підсилювач. Коефіцієнт підсилення 10 дБ. Після того проходить через смугопропускний фільтр. Нижня частота якого дорівнює 239,5 ГГц і верхня 240,5 ГГц. Звідти на ідеальний приймач, де вимірюється BER.

5. Результати моделювання.

В системі використовується сигнал промодульований QAM-128.

Якість модуляції системи оцінюється параметром MER (Modulation Error Ratio) за зоряним сузір'ям (Рис. 2):

$$MER = 10 \log \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

де P_1 , P_2 – середня потужність одного символу та помилки відповідно.

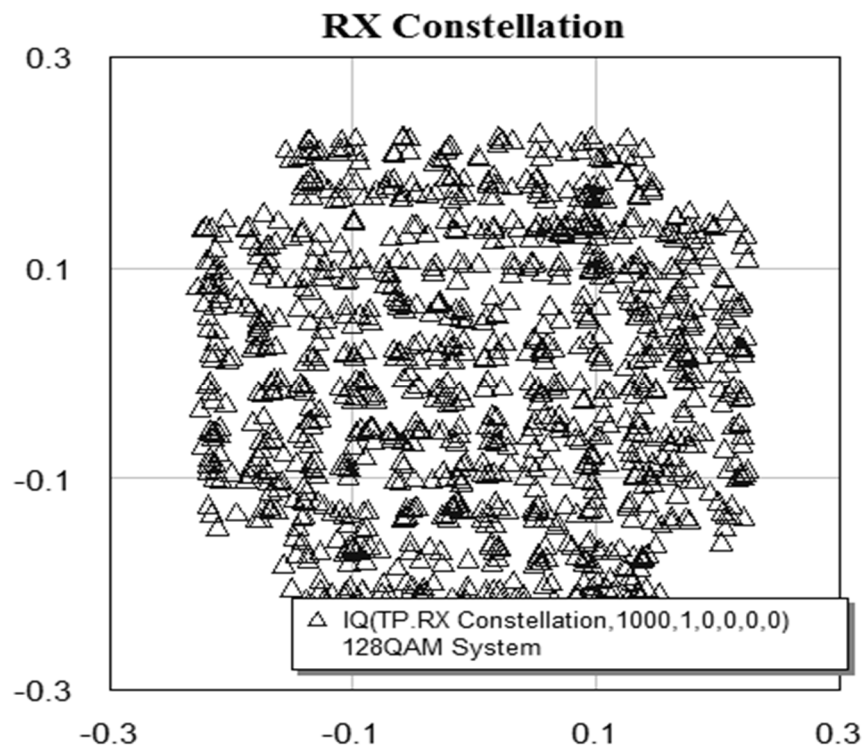


Рис. 2. Зоряне сузір'я в системі QAM-128

Підвищуючи рівень модуляції, збільшується спектральна ефективність сигналу (зростає кількість переданих біт в одному символі). Тим не менш, якщо рівень потужності джерела залишається постійним, крапки в зоряному сузір'ї розташовуються ближче одна до одної, завадостійкість системи знижується - характеристика BER погіршується. Таким чином, QAM більш високих порядків можуть передавати більший обсяг біт в символі, але менш надійно, ніж QAM низьких порядків з постійним рівнем потужності.

Спектр сигналу показаний на Рис 3., де можна побачити на робочій частоті 240 ГГц потужність сигналу має свій максимум і складає після проходження підсилювача потужності -2.7 дБм, на виході з фільтру складає -25.66 дБм і після малошумлячого підсилювача -4.86 дБм.

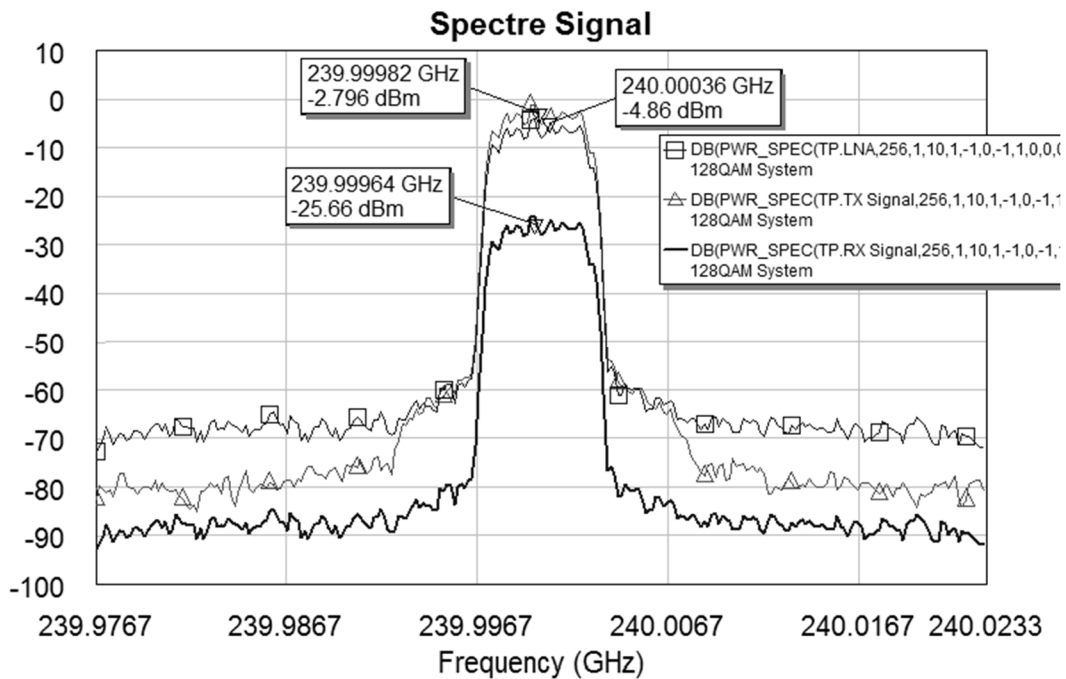


Рис. 3. Потужність сигналу у різних точках системи

Наступним було визначення лінійних властивостей підсилювача на виході з першого змішувача. Векторний аналізатор спектру (VSA) підключений до підсилювача потужності й використовується для побудови амплітудної характеристики підсилювача.

Як видно з Рис. 4, миттєві значення сигналу не виходять вище точки компресії 1 дБ (-15 дБм) і підсилювач не переходить у нелінійний режим.

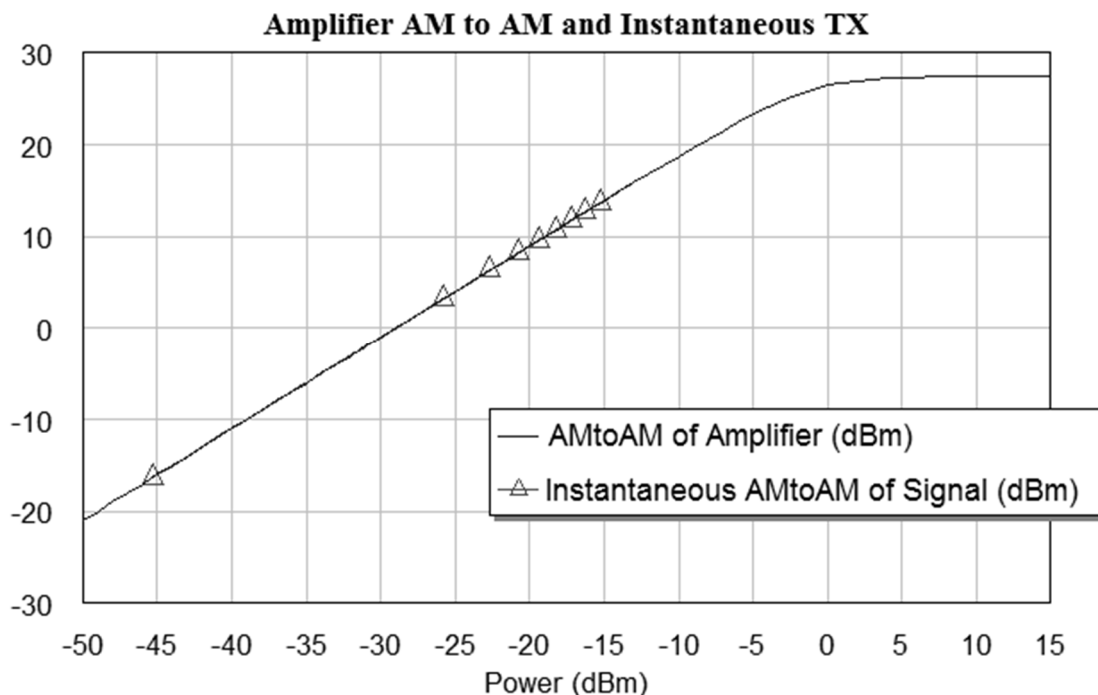


Рис. 4. Амплітудна характеристика підсилювача

Змодельована система орієнтована на демонстрацію характеристик підсилювача потужності передавача, що характеризується нелінійною характеристикою підсилення. Для переходу підсилювача в нелінійний режим, у схемі передбачений елемент «Атенюатор» перед підсилювачем потужності, що виконує функцію послаблення рівня сигналу до заданого рівня перед подачею сигналу на вхід підсилювача потужності

На Рис. 5 показані характеристики АМ/АМ підсилювача потужності при зменшенні значення точки перетину інтермодуляції першого и третього порядку перед його подачею на підсилювач потужності, що призводить до переходу підсилювача в нелінійний режим.

У випадку ж недостатнього ослаблення сигналу перед подачею на вхід підсилювача, достатнє ослаблення сигналу на вході підсилювача виконуватися не буде і підсилювач буде переходити в нелінійний режим (Рис. 5), тобто робоча точка може знаходитися вище точки компресії. Тому необхідно зменшити амплітуду сигналу, для того щоб знову працювати на лінійній ділянці.

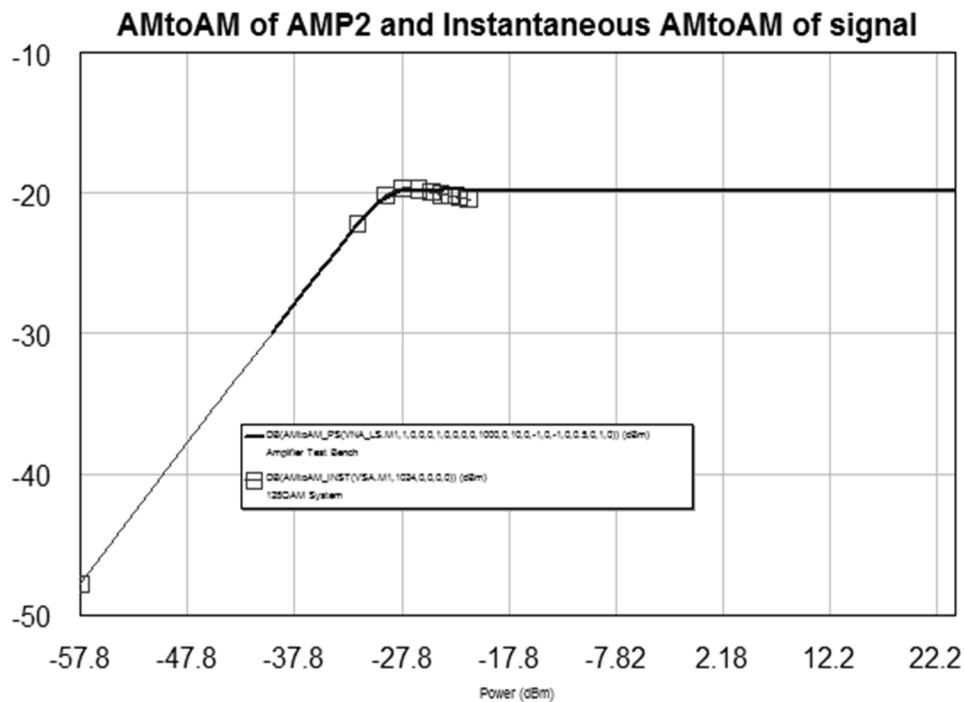


Рис. 5. Перехід підсилювача в нелінійний режим

Результати моделювання ймовірності бітової помилки (BER) обчислюються як функція рівня сигналу на вході приймача на основі моделювання за методом Монте Карло (Monte Carlo). Послаблення сигналу на вході підсилювача потужності передавача використовується для установки підходящого рівня спектральної характеристики.

На рівні BER 10^{-4} , SNR дорівнює 27.2 (Рис. 6).

6. Висновки

У статті розглянуто якісні та кількісні показники існуючих систем в терагерцовому діапазоні. Був зроблений порівняльний аналіз залежності BER від частоти та швидкості системи, розглянуті сукупні показники, вхідна та віхи дна потужність. Наступним кроком була проведена розробка моделі безпроводної системи і аналіз отриманих результатів. Базовими критеріями було отримання найкращих сукупних якісних характеристик та кращої BER – результат $1 \cdot 10^{-6}$, що, виходячи з аналізу інших систем, лежить в межах норми для частоти 240 ГГц. В результаті того, що були задані вимоги та параметри до окремого елемента системи, можна проектувати окремі частини за цими вимогами.

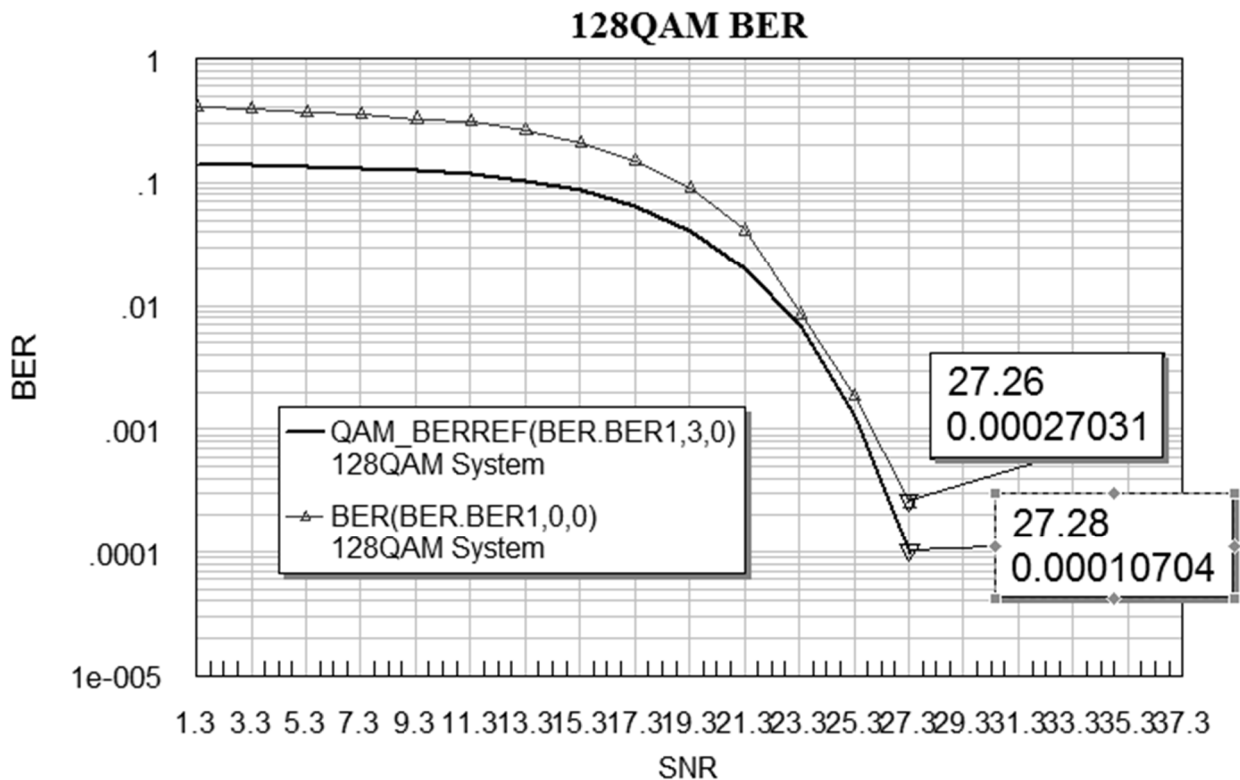


Рис. 6. Змодельовані характеристики BER при роботі підсилювача в нелінійному режимі

Література

1. Tae Jin Chung. 10-Gbit/s Wireless Communication System at 300 GHz / Tae Jin Chung, Won-Hui Lee // ETRI Journal. – 2013. – № 3. – P. 386-296.
2. Antes J. System concept and implementation of a mmW wireless link providing data rates up to 25 Gbit/s / J. Antes, J. Reichart // Institute of Technology, Institut fur Hochfrequenztechnik und Elektronik. – 2012. – № 5. – P. 220-234.
3. Antes J. MMIC based wireless data transmission of a 12.5 Gbit/s signal using a 220 GHz carrier / J. Antes, D. Lopez-Diaz // Proceedings of the 41st European Microwave Conference. – 2011. – № 10. – P. 238-242.
4. Kallfass I. Wireless DVB-C Transmission at 220 GHz Using Active Single-Chip Receive and Transmit MMICs / I. Kallfass, A. Tessmann // published in IEEE Int. Microwave Symposium, Baltimore, 2011. – P. 120-129.
5. Lopez-Diaz D. A 240 GHz Quadrature Receiver and Transmitter for Data Transmission up to 40 Gbit/s / D. Lopez-Diaz, A. Tessmann, A. Leuther // Proceedings of the 8th European Microwave Integrated Circuits Conference. -2013. -P. 89-91.
6. Христенко В. І. Моделирование радиосистемы на частоте 130 ГГц с использованием QPSK модуляции / В. И. Христенко, Б. Н. Шелковников, О. В. Бойченко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – № 2(18). – С. 63-69.

Дата надходження в редакцію: 22.01.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. В. Бойченко